



**Gonçalo Miguel Domingos Espada Pereira**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Estudo CFD do Convergente de um Túnel Aerodinâmico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, DEMI/FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Arguentes: Prof. Doutor José Manuel paixão Conde,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL  
Prof. Doutor António Rafael Janeiro Borges,  
Professor Catedrático Jubilado, FCT/UNL

Vogais: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro 2016**



**Gonçalo Miguel Domingos Espada Pereira**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Estudo CFD do Convergente de um Túnel Aerodinâmico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, DEMI/FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Arguentes: Prof. Doutor José Manuel paixão Conde,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL  
Prof. Doutor António Rafael Janeiro Borges,  
Professor Catedrático Jubilado, FCT/UNL

Vogais: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

**Dezembro 2016**

## **Estudo CFD do Convergente de um Túnel Aerodinâmico**

Copyright © 2016 de Gonçalo Miguel Domingos Espada Pereira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*À minha família, a quem devo ser quem sou hoje...*



## **Agradecimentos**

Quero antes de mais agradecer ao Professor Daniel Vaz pela oportunidade que me concedeu em realizar este trabalho. Pelas muitas indicações, conselhos e ajuda preciosa, sem os quais não o poderia ter realizado com sucesso, e pelo préstimo que sempre demonstrou para comigo.

Ao Professor Catedrático Jubilado António Rafael Janeiro Borges, a quem se deve a iniciativa de procurar equipar o Laboratório de MFTA com um túnel de aerodinâmico didático, da qual resultou a possibilidade de realizar a presente dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, pela disposição dos meios computacionais, de software e espaço de trabalho.

Aos meus familiares e amigos, que ao longo desta etapa da vida sempre estiveram comigo e me ajudaram, com um agradecimento especial ao Palma, ao Monteiro, ao David, ao Carlos e ao Miguel.

À minha Nadine, pelo seu amor e por ser o maior agente motivador que poderia ter.

Por fim à minha família, aos meus pais e avós, a quem devo tudo o que tenho, o que sou e o que aprendi. São eles a minha referência enquanto ser humano. É também deles o mérito deste trabalho.





# Resumo

---

O Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) encontra-se equipado com um túnel aerodinâmico de circuito fechado, utilizado para investigação científica e para estudos encomendados. Devido ao cuidado e aos custos que a sua operação requer, não se encontra disponível para utilização não supervisionada por parte dos estudantes. Existe a necessidade de dotar o LMFTA com um túnel aerodinâmico de pequenas dimensões para fins didáticos. Este trabalho visa ser um estudo inicial para o seu projeto.

Para este trabalho, tomou-se como objetivo identificar a melhor geometria para o convergente do túnel aerodinâmico, recorrendo à ferramenta dos fluidos computacional, FLUENT®, tomando como ponto de partida um ábaco disponível na literatura, desenvolvido para redução da área da secção circular de condutas, definindo o contorno do convergente por dois ramos de parábola cúbica, coincidentes no ponto de inflexão (PI) do convergente. São estudadas diversas posições para este ponto ao longo do comprimento do convergente, com vista a identificar eventuais formas do convergente que conduzam a perturbações indesejáveis no escoamento. Os objetivos do estudo *CFD* são: analisar o escoamento em convergentes de secção circular, quer na região interdita, quer na permitida do ábaco e determinar a geometria do convergente que apresenta os melhores resultados para o escoamento à entrada da secção de teste; determinar a melhor razão de áreas, entre a entrada e a saída do convergente, 4:1 ou 9:1; compreender qual a melhor forma de estender as indicações do ábaco a convergentes de secção não circular. Identificam-se modelos de turbulência, disponibilizados pela ferramenta computacional, para o estudo do escoamento no interior do túnel aerodinâmico. Foi ainda objetivo do trabalho, modelar a queda de pressão na rede a jusante do divergente do túnel, recorrendo a User Defined Function escrita propositadamente, atuando numa zona delimitada do domínio, em que a pressão decresce com a velocidade do escoamento. O escoamento dos diferentes convergentes estudados é comparado através de diversos critérios: variação do  $C_p$ , do  $C_f$  e parâmetros que permitem determinar se a camada limite se encontra prestes a separar – a espessura da quantidade de movimento longitudinalmente ( $\theta$ ), a espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ) e o fator de forma ( $H$ ) são obtidos através de medições num pequeno número de secções antes, depois e no PI do contorno. Para avaliar estas medidas é necessário obter primeiro uma espessura da camada limite ( $\delta$ ). A definição habitual de  $u=0,99U$  mostra-se inadequada para os perfis de velocidades que apresentam deformações em relação ao escoamento completamente desenvolvido. Foi desenvolvido um processo robusto para obter valores de delta com mais significado.

Concluiu-se que a ferramenta computacional identificou com sucesso a zona do ábaco onde ocorre separação do escoamento, para os convergentes mais curtos. O contorno do convergente associado a  $c/L=0,3$  apresenta o melhor compromisso entre um escoamento de qualidade e o menor comprimento. A melhor razão de áreas a aplicar entre a entrada e a saída do convergente é a 9:1. Para condutas de secção retangular, deve ser utilizado o seu diâmetro hidráulico para a interpretação do ábaco. Foi criada com sucesso a *UDF* que permite modelar numericamente os elementos de redução de turbulência do escoamento.

**Palavras-chave:** Túnel aerodinâmico; convergente; CFD; simulação numérica; modelos de turbulência; camada limite; UDF.

---

# Abstract

---

The Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) is currently equipped with a closed return wind tunnel that has been used for scientific research and for contracted studies. However, high operation costs and complexity make it impossible for students to use it unless supervised. Therefore, there is a need to provide the LMFTA with a wind tunnel of small proportions for didactic purposes. The present work is a first step for this project.

As such, numerical research is done to find the best geometry for the wind tunnel's convergent section, by using computational fluid dynamics code, FLUENT®, that analyses the flow. Starting with an abacus present in the literature, developed for the reduction of the conducts circular section area, the convergent contour is defined by a two branches in the form of cubic parabolas. These meet at an inflexion point (while ensuring continuity of the slope). A number of positions of this inflexion point along the length of the convergent are studied, having as guideline an abacus available in the literature, which identifies shapes that produce unwanted flow disturbances. Therefore, the *CFD* study aims at: analysing the flow in convergents of circular cross-section in both the forbidden and allowable regions of the abacus, and establish the convergent's geometry which shows the best results for the flow at the beginning of the test section; determine the best cross-ratio between the inlet and outlet sections, 4:1 or 9:1; gain insight into the best way to extend the abacus guidelines to non-circular section convergents. Turbulence models made available by the computational tool are identified in order to study the wind tunnel inside flow. On what regards the screen's pressure drop after the tunnel's divergent, it was modelled via a User Defined Function written for this purpose, in an actuator zone, in which the pressure drops according to the velocity of the flow. The various convergent sections studied are compared based on several criteria: the way the  $C_p$ , the  $C_s$  and parameters change allowing to determine whether the boundary layer is near to separation – longitudinal profiles of momentum thickness ( $\theta$ ), vertical displacement ( $\delta^*$ ) and shape-factor ( $H$ ) are obtained based on a small number of sections before and after the convergent as well as at the inflexion point. To evaluate these measures it is first necessary to obtain the boundary layer thickness ( $\delta$ ). The usual definition of  $u=0.99U$  proves weak for this type of flow and hence a robust procedure to obtain more meaningful values of delta has been developed.

It has been concluded that the computational tool successfully identified the abacus region where flow separation occurs, for the shortest convergents. The nozzle shape related with  $c/L=0.3$  shows the best compromise between flow quality and short length. The best area-ratio to apply to the convergent is 9:1. For rectangular cross-section conducts the hydraulic diameter should be considered for the abacus interpretation. By creating an *UDF*, the turbulence reduction elements have been successfully numerically modelled.

**Keywords:** Wind tunnel; nozzle; CFD; numerical simulation; turbulence models; boundary layer; UDF.

---

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.1.1	<i>Túnel aerodinâmico em desenvolvimento.....</i>	<i>2</i>
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	6
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1	EQUIPAMENTOS, ÁBACO, CAMADA LIMITE E FUNDAMENTOS DE TURBULÊNCIA .	7
2.1.1	<i>Principais tipos de túneis aerodinâmicos.....</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Túnel instalado no LMFTA .....</i>	<i>10</i>
2.1.3	<i>Descrição dos constituintes do túnel aerodinâmico em desenvolvimento .....</i>	<i>10</i>
2.1.4	<i>Ábaco do estreitamento hidráulico de Levin .....</i>	<i>18</i>
2.1.5	<i>Camada limite .....</i>	<i>20</i>
2.1.6	<i>Fundamentos de turbulência .....</i>	<i>24</i>
2.2	ASPETOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS .....	26
2.2.1	<i>Equações RANS.....</i>	<i>26</i>
2.2.2	<i>Modelos de turbulência.....</i>	<i>26</i>
2.2.3	<i>Funções de parede.....</i>	<i>29</i>
2.2.4	<i>Discretização do domínio .....</i>	<i>31</i>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1	FORMULAÇÃO CFD DO PROBLEMA .....	35
3.1.1	<i>Domínio computacional .....</i>	<i>35</i>
3.1.2	<i>Tipos de discretização do domínio .....</i>	<i>36</i>
3.1.3	<i>Condições fronteira.....</i>	<i>38</i>
3.2	MODELOS NUMÉRICOS .....	40
3.2.1	<i>Modelos de turbulência.....</i>	<i>40</i>
3.2.2	<i>Funções de parede.....</i>	<i>41</i>
3.2.3	<i>Esquemas numéricos.....</i>	<i>41</i>

3.2.4	<i>Modelo, implementado por UDF, de uma rede com perda de carga.</i>	41
3.3	CRITÉRIOS PARA A SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO .....	44
3.3.1	<i>Espessuras de camada limite .....</i>	45
3.3.2	<i>Coeficientes de pressão e de atrito.....</i>	46
3.3.3	<i>Intensidade turbulenta.....</i>	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1	DEFINIÇÃO DE MALHAS E MODELOS .....	51
4.1.1	<i>Apropriação da ferramenta de geração de malha, FLUID FLOW.....</i>	52
4.1.2	<i>Seleção do modelo de turbulência .....</i>	64
4.1.3	<i>Estudo de independência da malha.....</i>	66
4.2	ANÁLISE DE CRITÉRIOS PARA A SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO .....	70
4.2.1	<i>Critérios baseados em parâmetros da CL.....</i>	71
4.2.2	<i>Critérios baseados nos coeficientes de pressão e de atrito.....</i>	76
4.3	EFEITOS DO RÁCIO DE ÁREAS .....	88
4.3.1	<i>Perda de carga .....</i>	89
4.3.2	<i>Variação da intensidade turbulenta.....</i>	90
4.4	PROJETO DO CONVERGENTE.....	92
4.4.1	<i>Métodos de interpretação do ábaco.....</i>	93
4.4.2	<i>Comparação dos métodos.....</i>	96
4.5	RESULTADOS DA MODELAÇÃO DA REDE POR UDF.....	100
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>105</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	105
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	108
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>115</b>
	DETERMINAÇÃO DAS ESPESURAS DA CAMADA LIMITE .....	127
	ÍNDICE DE DESENHOS.....	133
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>141</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1– Posições possíveis para a secção de saída do convergente: na vertical (esquerda) e na horizontal (direita).....	2
Figura 1.2 – Aspeto do anteprojecto do túnel aerodinâmico a construir.....	3
Figura 2.1 – Categorias de túneis aerodinâmicos segundo o regime de velocidade .....	7
Figura 2.2 – Túnel de 1901 dos irmãos Wright [Wright Brothers, 2010].....	8
Figura 2.3 – Modelo do túnel de Gustave Eiffel de 1912 [Wind Engineering, 2012].....	8
Figura 2.4 – Projecto original do túnel de Ludwig Prandtl de 1907, a construir na cave de um edifício [Max-Planck-Gesellschaft, 2016].....	9
Figura 2.5 – Ames Research Center da Nasa, inaugurado em 1958, é o maior túnel aerodinâmico do mundo [Nasa, 2008].....	9
Figura 2.6 – Ventilador disponível no LMFTA para utilização no túnel aerodinâmico didático (modelo METEC/F.lli Ferrari) .....	11
Figura 2.7 – Detalhe da representação esquemática de «favos de abelha».....	13
Figura 2.8 – Detalhe das proporções entre a espessura ocupada pelos fios da rede e o espaço livre para o escoamento. ....	14
Figura 2.9 – Esquema de recirculações geradas num convergente retilíneo.....	15
Figura 2.10 – Representação dos contornos possíveis para a redução de secção no convergente .....	16
Figura 2.11 – Aspeto do ábaco do estreitamento hidrodinâmico [Levin, 1968] .....	18
Figura 2.12 – Placa plana: espessura da CL e tensões tangenciais geradas na superfície [White, 2011].....	20
Figura 2.13 – Placa plana: espessura de deslocamento [White, 2011] .....	22
Figura 2.14 – Efeito do gradiente de pressão sobre o perfil de velocidades do escoamento junto a uma superfície sólida [White, 2011].....	23
Figura 2.15 – Representação de uma <i>vena contracta</i> [White, 2011].....	24
Figura 2.16 – Critérios de discretização do domínio próximo de uma parede, para uso de: funções de parede (a), resolução direta (b) [LEAP Australia Pty Ltd, 2012]. .	30
Figura 2.17 – Representação das condições fronteira a aplicar (a) e o aspeto do refinamento da malha junto às paredes do convergente (b) [Leifsson e Koziel, 2015].....	32

Figura 3.1 – Domínio computacional 2D repartido em 3 faces, eixos coordenados, e localização das superfícies fronteira (caso exemplo: $D_0/D=3$ , $c/L=0,60$ ) .....	38
Figura 3.2 – Secções do convergente onde são realizadas leituras dos perfis de velocidades: representadas no convergente $D_0/D=3$ e $c/L=0,20$ .....	45
Figura 4.1 – Tipo de elementos usados para aumentar o número de células segundo sentido positivo do eixo radial: Quad distorcidos (à esquerda) e Tri (à direita). .....	54
Figura 4.2 – Comparação de malha gerada: pelo método <i>Multizone Quad/Tri</i> (em cima) e pelo método <i>Quadrilateral Dominant</i> (em baixo).....	56
Figura 4.3 – Malha utilizando um <i>Growth Rate</i> de 1,20 (demasiado elevado) leva a estiramentos da malha na interface com a malha estruturada aplicada na CL.....	57
Figura 4.4 – Otimização da malha pertencente à CL: importância do crescimento de forma uniforme e a proporção dos lados das células na CL .....	58
Figura 4.5 – Efeito do comando <i>Sizing</i> na secção de saída de convergentes para malhas geradas por diferentes métodos: <i>Multizone Quad/Tri</i> (em cima) e <i>Quadrilateral Dominant</i> (em baixo) .....	59
Figura 4.6 – Pormenor da malha refinada junto da secção de entrada e simultâneo crescimento desde a camada-limite .....	60
Figura 4.7 – Pormenor de elementos distorcidos - à esquerda - e consequentemente corrigidos - à direita: células dos casos a) e b) próximas à CL e do caso c) interior ao domínio .....	61
Figura 4.8 – Suavização do ângulo entre elementos adjacentes mas em lados opostos da linha divisória do domínio .....	62
Figura 4.9 – Retificação da malha na separação de faces, junto à CL, em termos das coordenadas radiais dos nós .....	62
Figura 4.10 – Repartição desnecessária de região quase triangular em elementos Tri ....	63
Figura 4.11 – Defeitos comuns em malha gerada sem os inúmeros parâmetros otimizados e a respetiva malha corrigida .....	63
Figura 4.12 – Pormenor das linhas de corrente à entrada do convergente $c/L=0,11$ obtidos com os modelos de turbulência: a) $\kappa-\epsilon$ , b) $\kappa-\epsilon$ RNG, c) $\kappa-\omega$ , d) $\kappa-\omega$ SST .....	65
Figura 4.13 – Estudo paramétrico dos perfis de velocidades verificados na secção de saída do domínio para diversos níveis de refinamento de malha .....	67
Figura 4.14 – Valores de $H$ em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente.....	69
Figura 4.15 – Valores máximos de $y^+$ verificados no domínio computacional em função da espessura $h$ .....	69
Figura 4.16 – Valor da distância $y^+$ das malhas no ponto de inflexão dos contornos dos diversos convergentes estudados, para os rácios 4:1 e 9:1 .....	70
Figura 4.17 – Valor máximo da distância $y^+$ verificado ao longo da malha adjacente ao contorno dos diversos convergentes estudados, para os rácios 4:1 e 9:1 ...	70
Figura 4.18 – Espessura de deslocamento dos convergentes com $D_0/D=3$ , mostrando uma diminuição sucessiva com o aumento de $c/L$ .....	72
Figura 4.19 – Espessura de quantidade de movimento dos convergentes com $D_0/D=3$ ...	72

Figura 4.20 – Fator de forma do perfil dos convergentes com $D_0/D=3$ .....	74
Figura 4.21 – Comparação do parâmetro $H$ entre convergentes com rácios de área 4:1 e 9:1 .....	76
Figura 4.22 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,11$ . Relativo à zona interdita do ábaco, note-se o elevado valor de $H$ em $x/L=0$ .....	78
Figura 4.23 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,15$ . Relativo ao limite da zona interdita do ábaco, note-se o elevado valor de $H$ em $x/L=0$ .....	78
Figura 4.24 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,20$ . Note-se que a pressão estática na parede do convergente se aproxima da verificada na $\Phi$ .....	79
Figura 4.25 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,30$ . O $C_{pe}$ na parede assemelha-se muito a $C_{pe}(\Phi)$ pelo que diminuem os valores máximos dos gradientes de pressão adversos.....	79
Figura 4.26 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,60$ . Caso em que os valores da pressão estática na parede do convergente e no eixo de simetria se parecem assemelhar mais .....	80
Figura 4.27 – Critérios de análise no convergente 9:1, $c/L=0,99$ . Note-se nos elevados valores de $dC_{pe}/dx _w$ , $C_f$ e $H$ no final do convergente. Possibilidade de separação .....	80
Figura 4.28 – Critérios de análise nos convergentes: a) 4:1, $c/L=0,30$ ; b) 9:1, $c/L=0,30$ . Note-se no gradiente adverso mais elevado no caso 4:1 do que no 9:1 à entrada do convergente.....	81
Figura 4.29 – Valores máximos do gradiente adverso de pressão observados para os convergentes de rácios de áreas 4:1 e 9:1. ....	84
Figura 4.30 – Comparação dos coeficientes de pressão e de fricção entre (a) uma contração abrupta com um ponto anguloso e o (b) convergente $c/L=0,99$ , mostrando a existência de bolha de recirculação para o primeiro caso.....	87
Figura 4.31 – Perda de carga verificada nos convergentes com rácios de área de 4:1 e de 9:1, segundo diferentes valores de $c/L$ .....	89
Figura 4.32 – Perda de carga verificada no convergente com rácio de áreas 9:1, segundo diferentes valores de $c/L$ .....	89
Figura 4.33 – Variação da intensidade turbulenta entre as secções de saída e de entrada do convergente, mostrando que o rácio de áreas 9:1 apresenta a maior redução de turbulência .....	91
Figura 4.34 – Contorno do convergente e respetivas relações polinomiais que o descrevem [L. Levin, 1968]. ....	94
Figura 4.35 – Representação dos diâmetros considerados através dos diferentes métodos, nas secções de entrada e de saída, para a utilização do ábaco de Levin.....	97
Figura 4.36 – Contornos dos convergentes obtidos através de diferentes métodos de interpretação do ábaco: as silhuetas associadas aos métodos Área e $D_H$ são muito semelhantes. ....	98
Figura 4.37 – Variação da área da secção do convergente ao longo do comprimento axial: valor dos métodos Área e $D_H$ são muito semelhantes .....	99

Figura 4.38 – Variação incorreta da pressão no interior de uma conduta devido à implementação da macros <code>DEFINE_ADJUST</code> , mostrando que a implementação da <i>UDF</i> é inapropriada. ....	101
Figura 4.39 – Variação pretendida da pressão no interior de uma conduta devido à implementação da macros <code>DEFINE_SOURCE</code> na <i>UDF</i> . ....	101
Figura 4.40 – Contornos da queda de pressão associada à implementação do meio poroso (a) e detalhe da respetiva malha de discretização (b). ....	102
Figura 7.1 – Discretização da malha do convergente através de diferentes métodos automáticos: a) <i>Face Meshing</i> (Map); b) <i>Multizone Pave</i> (all quad); c) <i>Multizone Uniform</i> (Quad/Tri) .....	116
Figura 7.2 – Discretização da malha do convergente através de diferentes métodos automáticos: a) <i>Multizone Uniform</i> (all quad); b) <i>Quadrilateral Dominant</i> (Quad/Tri).....	117
Figura 7.3 – Malhas menos conseguidas (de a) a e)) e a otimizada (f), relativas ao convergente $c/L=0,20$ e $D_0/D=3$ , de secções de entrada e de saída de 1200 e 400 mm respetivamente e comprimento de 1350 mm .....	118
Figura 7.4 – Malha de discretização empregue no estudo <i>CFD</i> : a) domínio computacional; b) ampliação da superfície do convergente (exemplo referente ao convergente 9:1, $c/L=0,17$ ). ....	119
Figura 7.5 – Pontos do ábaco estudados para malha com espessura $h$ de 0,15 mm [adaptado de Levin, 1968] .....	119
Figura 7.6 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S1. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.7 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S2. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.8 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S3. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.9 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S4. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.10 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S5. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.11 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S6. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	120
Figura 7.12 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S7. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	121
Figura 7.13 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S8. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	121
Figura 7.14 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S9. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	121
Figura 7.15 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,20$ : secção S10. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta. ....	121
Figura 7.16 – Perfil de velocidades do convergente $D_0/D=3$ , $c/L=0,15$ , secção S5, indica tendência de possíveis recirculações no perfil junto da parede. ....	121
Figura 7.17 – Valores de delta em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente .....	122



Figura 7.18 – Valores de $\delta^*$ em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente .....	122
Figura 7.19 – Valores de $\theta$ em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente .....	122
Figura 7.20 – Valores máximos de $y^+$ no PI do contorno em função da espessura $h$ .....	122
Figura 7.21 – Razão entre a intensidade turbulenta à entrada e à saída do convergente, em função da espessura da malha junto à parede do convergente .....	122
Figura 7.22 – Linhas de corrente numa conduta com contração brusca, mostrando o efeito de uma <i>vena contracta</i> . .....	124
Figura 7.23 – Linhas de corrente ampliadas na zona da secção final do converge $c/L=0,99$ , mostrando que não existe afastamento das linhas de corrente da parede. ....	124
Figura 7.24 – <i>UDF</i> implementada sem sucesso: recorre à macros <code>DEFINE_ADJUST</code> ....	125
Figura 7.25 – <i>UDF</i> implementada com sucesso: recorre à macros <code>DEFINE_SOURCE</code> ...	125
Figura 7.26 – <i>Stencil</i> usado na média corrida de cinco pontos .....	127
Figura 7.27 – Representação de dois segmentos de reta consecutivos do perfil de velocidades, formando o ângulo $\beta$ entre si. ....	129
Figura 7.28 – Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Desenho de Conjunto .....	135
Figura 7.29 – Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Alçado Principal.....	137
Figura 7.30 – Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Planta .....	139
Figura 8.1 – Ábaco: Redução suave da área da secção circular de condutas [Levin, 1968].....	142



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Critérios de qualidade da malha e respectivos limites para uma malha aceitável (Fluent, 2011). .....	33
Tabela 3.1 – Métodos automáticos de geração de malha possíveis no FLUID FLOW e respectivo tipo de elementos gerados .....	37
Tabela 3.2 – Condições fronteira aplicadas nas superfícies fronteira criadas .....	39
Tabela 3.3 – Valores das coordenadas axiais adimensionalizadas onde se situam as secções de leitura dos perfis de velocidades .....	46
Tabela 4.1 – Critérios de qualidade e número de elementos das malhas usadas no estudo de independência de malha .....	66
Tabela 4.2 – Quantificação dos valores médios dos critérios de qualidade da malha $h=0,15$ mm .....	67
Tabela 4.3 – Resíduos obtidos para diferentes malhas no estudo de independência .....	68
Tabela 4.4 – Resultados de diversos parâmetros para malhas com diferentes níveis de refinamento .....	68
Tabela 4.5 – Comparação dos valores obtidos para o coeficiente de fricção: analiticamente e computacionalmente.....	77
Tabela 4.6 – Valores dos máximos do gradiente adverso de pressão, verificados próximo da secção de entrada e de saída do convergente.....	82
Tabela 4.7 – Espessura da camada limite para convergentes $D_0/D=3$ .....	88
Tabela 4.8 – Obtenção de dimensões distintas para diferentes características do convergente através de diferentes métodos .....	98
Tabela 7.1 – Espessura da camada limite para convergentes $D_0/D=3$ .....	123
Tabela 7.2 – Perda de carga e variação da intensidade turbulenta entre as secções de entrada e de saída dos convergentes .....	123
Tabela 7.3 – Descrição das <i>UDF</i> .....	126



# Nomenclatura

## Símbolos latinos

$c$	Distância longitudinal do ponto de inflexão do contorno do convergente, à sua secção de entrada (m)
$C_f$	Coeficiente de fricção
$C_{pe}$	Coeficiente de pressão estática na parede
$\left. \frac{dC_{pe}}{dx} \right _w$	Valor na parede do gradiente espacial do coeficiente de pressão estático
$\mathcal{L}$	Relativo ao eixo de simetria do domínio computacional ( <i>center line</i> )
$d$	Diâmetro (m)
$D$	Diâmetro da secção de saída do convergente (m)
$D_0$	Diâmetro da secção de entrada do convergente (m)
$D_H$	Diâmetro hidráulico (m)
$f$	Fator de atrito de Darcy
$h$	Espessura da célula computacionalmente adjacente à superfície sólida (m)
$H$	Fator de forma do perfil de velocidade
$I_{turb}$	Intensidade turbulenta do escoamento (%)
$L$ ou $L_{conv}$	Comprimento do convergente (m)
$L_{eq}$	Comprimento equivalente (m)
$m$	Diferença entre os raios das secções de entrada e de saída de um convergente (m)
$N$	Número de hexágonos
$P$	Pressão estática (Pa)

$r$	Coordenada radial (m)
$R$	Raio de conduta (m)
$Re$	Número de Reynolds
$V$	Velocidade de escoamento (m/s)
$V_{avg}$	Média espacial da magnitude da velocidade (m/s)
$V_x$	Componente axial da velocidade (m/s)

#### **Símbolos gregos**

$\beta_f$	Porosidade
$\delta$	Espessura da camada limite (m)
$\delta^*$	Espessura de deslocamento da camada limite (m)
$\varepsilon$	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (kg/(m.s))
$\theta$	Espessura de quantidade de movimento da camada limite (m)
$\kappa$	Energia cinética turbulenta (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$\mu$	Viscosidade dinâmica (kg/(m.s))
$\xi$	Coeficiente da perda de carga localizada
$\rho$	Massa volúmica (kg.m <sup>-3</sup> )
$\tau_w$	Tensão de corte na parede (Pa)
$\nu$	Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)

## Abreviaturas

CL	Camada Limite
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
F400	Face do convergente correspondente ao lado de dimensão de 400 mm na seção de saída retangular
F600	Face do convergente correspondente ao lado de dimensão de 600 mm na seção de saída retangular
LMFTA	Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada
Map	Malha estruturada
NMFTA	Núcleo de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Pave	Malha não estruturada constituída por elementos quadrangulares (Quad)
PI	Ponto de inflexão
Quad	Malha estruturada constituída por elementos quadrangulares
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
Tri	Malha constituída por elementos triangulares
UDF	User Defined Function







# INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Uma faculdade de engenharia é pautada por oferecer aos seus alunos as condições necessárias para uma aprendizagem com rigor, onde os diferentes domínios lecionados são inalienáveis da experimentação. A juntar a este facto a presença de um núcleo de engenharia mecânica com o propósito de conceção de projetos, é de toda a relevância a criação de um pequeno túnel aerodinâmico para trabalhos laboratoriais de índole didática.

Apesar de Meroney, Leitzl, Rafailidis e Schatzmann (1999) sugerirem a tendência futura de se substituírem cada vez mais os estudos realizados em túneis aerodinâmicos por análises *CFD*, devido à sua crescente fiabilidade e aos custos operacionais, concluíram que o mesmo não se verificou. Os túneis aerodinâmicos continuam a constituir uma ferramenta importante para estudos aerodinâmicos em engenharia (Moonen et al., 2006).

No entanto, devido aos grandes avanços computacionais e ao desenvolvimento de códigos mais eficientes, ao longo das últimas décadas, o estudo *CFD* tornou-se numa ferramenta essencial para o projeto e otimização de convergentes de túneis aerodinâmicos (Lastra et al., 2013; Moonen et al., 2006). É neste âmbito que se insere o trabalho realizado nesta dissertação: a modelação bidimensional do convergente e o projeto de um túnel aerodinâmico de pequenas dimensões, com vista a ser projetado, construído e instalado mais tarde no Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Os componentes de um túnel aerodinâmico são especialmente projetados e construídos de modo a assegurar um escoamento o mais uniforme possível, em termos espaciais e temporais, na secção de trabalho (Brusca, et al., 2011). O projeto do contorno de um convergente é crítico para que um túnel de vento conceba medições válidas (Lastra et al., 2013). Nesse sentido, teve-se em consideração inúmeros fatores, sendo os mais relevantes:

- Um fator essencial na conceção de túneis aerodinâmicos é obter um escoamento uniforme, o menos perturbado possível na secção de teste, em que a direção do escoamento pro-

duzido seja aproximadamente paralela ao seu eixo longitudinal do convergente, sem que se verifiquem separações importantes (Lastra et al., 2013; Brusca et al., 2011; Moonen et al., 2006) . Nesta dissertação descrevem-se diferentes técnicas de uniformização de escoamento a aplicar entre a saída do ventilador e a secção de teste de um túnel de pequeno comprimento com esse intuito;

- O aproveitamento do ventilador presente no laboratório, como forma de fornecer o caudal de ar ao túnel. Desta forma, o túnel será de circuito aberto, do tipo de sopro;

- A geometria do convergente é de grande importância no, entanto, não existe um procedimento comum para determinar a sua forma. O LMFTA identificou um ábaco onde se descreve a geometria de estrangulamentos hidráulicos, que desempenham a transição entre condutas de diferentes diâmetros, por forma a gerar a menor intensidade turbulenta no escoamento;

- Aspetos ergonómicos na sua utilização;

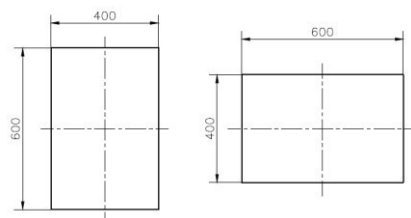
- O espaço disponível para a implementação do túnel aerodinâmico.

### 1.1.1 Túnel aerodinâmico em desenvolvimento

A decisão de conceber um túnel aerodinâmico do tipo de sopro deve-se maioritariamente ao facto de ser o modelo que se coaduna com o ventilador já existente no Laboratório de Fluidos e de Termodinâmica. Pelo que, no caso de implementação futura do mesmo, seria uma forma de reutilizar o equipamento disponível.

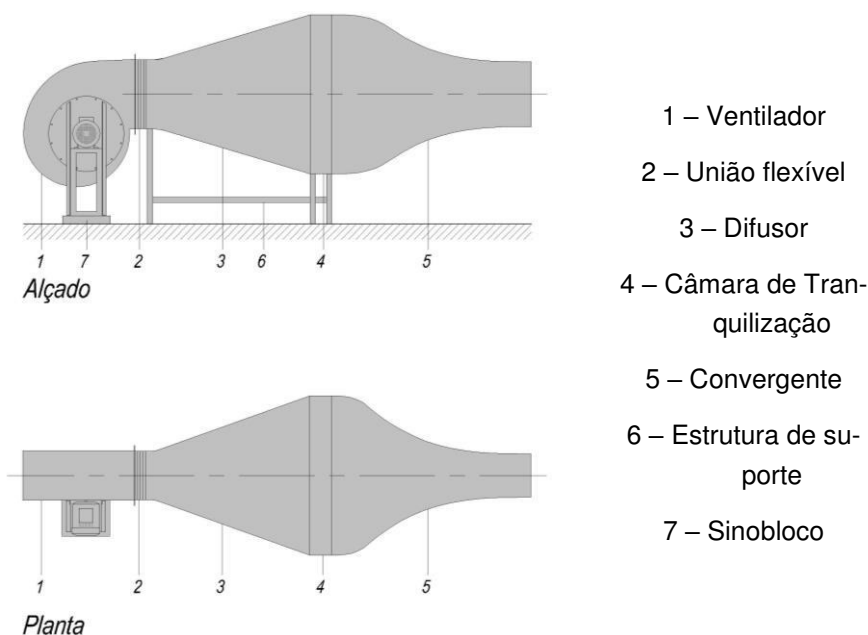
O túnel de vento será projetado por forma a se utilizar o ventilador já presente no LMFTA. Seguem-se algumas considerações simples de conceção para o anteprojeto do túnel aerodinâmico a construir futuramente:

- O formato do convergente de secção retangular segue o proposto pela literatura, sendo descrito por equações polinomiais de 3.<sup>o</sup> grau. Deste modo, obtém-se uma redução de secção que perturbe o mínimo possível o escoamento;
- A secção de saída do túnel terá uma configuração retangular ao invés de quadrada para permitir duas posições distintas para a secção de saída, possibilitando testar modelos de características diferentes. As dimensões assemelham-se às da saída do próprio ventilador – área de  $600 \times 400 \text{ mm}^2$  como representado na Figura 1.1.



**Figura 1.1– Posições possíveis para a secção de saída do convergente: na vertical (esquerda) e na horizontal (direita)**

- De modo a possibilitar as duas configurações de montagem para a secção de saída do convergente, é necessário que a secção de entrada do convergente seja quadrada, por forma a permitir posições de montagem distintas, conseguidas girando o convergente sobre o seu eixo longitudinal em 90°. Assim, o convergente deve encontrar-se afixado unicamente à restante estrutura do túnel (neste caso, a câmara de tranquilização), sem uma estrutura de apoio fixa associada a este, de modo a permitir as diferentes posições diferente de montagem;



**Figura 1.2 – Aspeto do anteprojecto do túnel aerodinâmico a construir**

- A cota do bordo inferior da secção de saída do convergente – assume-se a aresta com comprimento igual a 400 mm<sup>1</sup>, quando o convergente se encontra montado com a secção de saída na vertical – deverá situar-se a 900 mm do chão. Esta é a altura equivalente a uma bancada de laboratório, considerada uma cota ergonómica para se trabalhar. Isto significa que a cota do centro da secção de saída deverá ser 1200 mm;

<sup>1</sup> Nesta dissertação para dimensões físicas utilizam-se milímetros, nos restantes casos serão metros.

- Tendo em consideração que a saída do referido ventilador se situa a uma cota inferior ao desejado: o centro da sua secção de saída possui uma cota de 1122 mm do solo, ao invés dos 1200 mm necessários para obter o efeito descrito anteriormente (para melhor compreensão, ver Figura 7.29). Deve-se proceder a este ajuste beneficiando da utilização de um sinobloco como base para o ventilador;

O túnel de vento de sopro (circuito aberto) será constituído por um ventilador radial, uma tela, um difusor, uma câmara de tranquilização, um convergente, os apoios da estrutura e um sinobloco para servir como base para o ventilador. A secção de testes encontrar-se-á à saída do convergente. No interior do túnel, na câmara de tranquilização, encontram-se elementos cuja função é reduzir a turbulência no escoamento médio, quebrando os turbilhões de grandes dimensões presentes neste.

Na secção 2.1.3 segue-se uma breve explicação sobre os diversos componentes que compõem o túnel aerodinâmico, representados no anteprojeto da Figura 1.2.

## 1.2 Objetivos

O principal foco da dissertação consiste em modelar numericamente o convergente de um túnel aerodinâmico com recurso à ferramenta *CFD* comercial, graças ao rápido aumento de desempenho computacional nas últimas décadas (Moonen et al., 2006). Assim, pretende-se, através de estudos bidimensionais, determinar o contorno e as dimensões do convergente a ser empregue no túnel aerodinâmico, através da análise da turbulência do escoamento. A simulação numérica abrange o volume de controlo confinado pelo convergente – delimitado pelas suas secções de entrada, de saída e paredes - pelo que o volume abarcado pelos restantes constituintes, assim como pelo ventilador, não fazem parte do domínio da simulação.

Em termos de investigação, tem-se por objetivo comparar os resultados obtidos numericamente de um escoamento não reativo, através do ANSYS FLUENT®, com os resultados experimentais decorrentes da publicação de Levin (1968), pouco utilizados pela literatura, apesar de assentes num par de polinómios cúbicos. Estes definem a melhor configuração geométrica para a redução de secção numa conduta circular – no caso estudado nesta dissertação o convergente de secção retangular – por forma a perturbar o menos possível o escoamento. Neste sentido, pretende-se simular condições idênticas às descritas no ábaco que descreve o estreitamento hidráulico, não por forma a corroborar ou validar a geometria descrita – pois o gráfico baseia-se em resultados experimentais – mas sim por forma a definir em que medida a ferramenta numérica consegue aproximar-se desses resultados, bem como detetar e corroborar os limites de aplicabilidade deste. Em suma, verificar em que medida os resultados computacionais reproduzem da melhor forma os resultados empíricos.

Serão comparados ainda diferentes modelos de turbulência com o intuito de identificar os que providenciam melhores aproximações para a simulação numérica, recorrendo primeiramente aos usualmente aconselhados na literatura.

Inclui-se ainda como objetivo a recriação da perda de carga associada à rede de alisamento de escoamento, empregue com o propósito de diminuir a turbulência no escoamento. Nesta abordagem a rede não é modelada diretamente, mas com recurso à programação de uma

*UDF* que recrie a perda de pressão inculida pela mesma sobre o escoamento. Pretende-se, assim, criar uma ferramenta que, aquando da simulação do túnel de vento na íntegra, permita quantificar a perda de carga associada à rede, de modo a dimensionar e a definir o grau de opacidade da rede detalhadamente no futuro por forma a respeitar os restantes constrangimentos do projeto.

Desta forma, a modelação incide especialmente nos dois constituintes do túnel aerodinâmico que visam reduzir a turbulência do escoamento, pelo que o estudo realizado servirá de apoio ao projeto futuro dos diferentes componentes da instalação.

O presente trabalho possui como principal objetivo definir qual a melhor geometria do convergente para o túnel aerodinâmico a projetar. De modo a este objetivo ser alcançado é subdividido nos seguintes objetivos:

- Explorar a nova ferramenta de geração de malha do ANSYS®, o FLUID FLOW. Importa referir que à data de início dos trabalhos conducentes a esta dissertação não existia experiência no NMFTA desta ferramenta particular de construção de malhas computacionais. A ferramenta anteriormente utilizada no Núcleo era o GAMBIT® (FLUENT), mas que foi recentemente descontinuada;
- Comparar a adequabilidade de diferentes modelos de turbulência ao estudo do escoamento no interior do convergente e a seleção do mais indicado;
- Identificar métricas que permitam comparar objetivamente os diversos convergentes e identificar a forma do convergente mais interessante do ponto de vista do escoamento na câmara de teste do túnel de vento;
- Realizar simulações numéricas bidimensionais (geometria axissimétrica) para convergentes correspondentes a vários pontos no ábaco de Levin, identificado na literatura pelo NMFTA, sobre estreitamento hidráulico em condutas cilíndricas;
- Verificar se a ferramenta numérica corrobora os resultados experimentais de Levin;
- Estudar a região do ábaco intitulada como zona interdita, associada a formatos de convergentes que apresentem recirculação no seu escoamento;
- Determinar os contornos que produzem escoamentos que apresentem melhor qualidade;
- Comparar os convergentes com rácios de áreas entre a secção de entrada e a saída de 4:1 e 9:1;
- Encontrar o melhor método de estender as conclusões do estudo do ábaco, acerca de condutas circulares, para o convergente do túnel aerodinâmico a projetar, de secção retangular;
- Criar uma *UDF* que permita simular o efeito da rede para redução de intensidade turbulenta sobre o escoamento em termos de pressão, de modo a ser empregue em trabalhos futuros.

## 1.3 Organização da tese

O texto está dividido em 5 capítulos, sendo eles: Introdução, Revisão Bibliográfica, Métodos, Resultados e Discussão e, por último, Conclusão.

No capítulo 2 será apresentada a literatura analisada referente às diferentes tipologias de túneis de vento existentes, componentes que constituem o túnel de vento, conceitos de turbulência, apresentação do ábaco de estreitamento hidráulico, revisão da teoria da camada-limite e do gradiente de pressão, apresentando os parâmetros utilizados nos estudos realizados. Explica-se a forma de discretizar a malha e seus respectivos critérios de qualidade, fundamentos de turbulência, modelos numéricos de turbulência assim como outras particularidades do método numérico.

No capítulo 3 serão apresentadas as ferramentas numéricas (modelos, submodelos, etc.) a que se recorreu para a execução do trabalho. Além disso, apresenta-se considerações decorrentes da aprendizagem da ferramenta de criação de malha, o FLUID FLOW; a otimização das malhas geradas; estudo de independência da malha; bem como os métodos de análise aplicados.

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes das simulações numéricas realizadas no âmbito deste trabalho, nomeadamente: estudo das recirculações que ocorrem nos convergentes e comparação de diferentes contornos para o convergente através do auxílio do ábaco de estreitamento hidráulico; investigação sobre qual o melhor rácio entre as áreas de entrada e de saída do convergentes, se de 4 para 1, se de 9 para 1; descobrir o melhor método de estender os conhecimentos adquiridos com o estudo do ábaco para condutas de secção não circular e projeto do túnel de vento e o processo de criação da *UDF* com a finalidade de modelar os elementos de redução de intensidade turbulenta no escoamento.

No capítulo 5 descrevem-se as conclusões decorrentes da análise de dados apresentada no capítulo anterior, assim como sugestões para trabalho futuro.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em duas partes distintas. Na primeira, apresentam-se os diferentes tipos de túneis aerodinâmicos existentes, o túnel já existente no LMFTA, descrição dos constituintes principais do túnel aerodinâmico a desenvolver, de seguida apresenta-se o ábaco do estreitamento hidráulico e considerações sobre a camada limite, revendo a teoria da CL e dos gradientes de pressão e fundamentos sobre turbulência. Na segunda parte apresentam-se aspetos numéricos sobre as equações *RANS*, os modelos de turbulência, funções de parede e valor  $y^+$ , e por fim, discretização do domínio.

### 2.1 Equipamentos, ábaco, camada limite e fundamentos de turbulência

#### 2.1.1 Principais tipos de túneis aerodinâmicos

Existem diversas formas de classificar os diversos tipos de túneis aerodinâmicos. Segundo Roque e Mendes (2012) é possível catalogá-los, entre outras formas, por regime de velocidade e por geometria. Na Figura 2.1 encontram-se representados os diferentes tipos de túneis aerodinâmicos segundo o seu regime de velocidade.

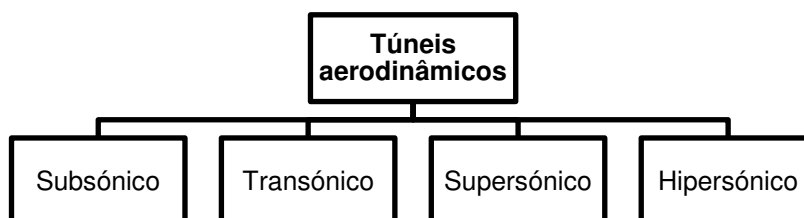
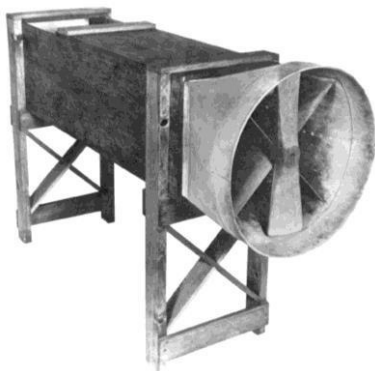


Figura 2.1 – Categorias de túneis aerodinâmicos segundo o regime de velocidade

No contexto do presente trabalho, o túnel aerodinâmico que se pretende desenvolver é subsónico, ou também denominado de baixa velocidade. É possível ainda diferenciar os túneis aerodinâmico a partir da sua geometria. As geometrias em que o fluido de trabalho é o ar são apresentadas de seguida.

**Circuito aberto:**

- Túnel Aerodinâmico de Sopros (*Blowdown*). O ventilador é instalado a montante da restante instalação. É o tipo de túnel aerodinâmico mais antigo, tendo sido utilizado inclusive pelos irmãos Wright (Figura 2.2) com o fim de otimização de perfis alares.
- Túnel Aerodinâmico do tipo Eiffel. O ventilador é montado a jusante da restante instalação, permitindo que a turbulência gerada por este não interfira tão severamente com a região de testes. A construção deste *design* data primeiramente de 1909, tendo o nome homólogo ao seu criador. Na réplica apresentada na Figura 2.3, é possível observar que houve a preocupação de afastar as paredes da câmara de testes por forma a diminuir o seu efeito dos dados experimentais.



**Figura 2.2 – Túnel de 1901 dos irmãos Wright [Wright Brothers, 2010]**



**Figura 2.3 – Modelo do túnel de Gustave Eiffel de 1912 [Wind Engineering, 2012]**

**Circuito fechado:**

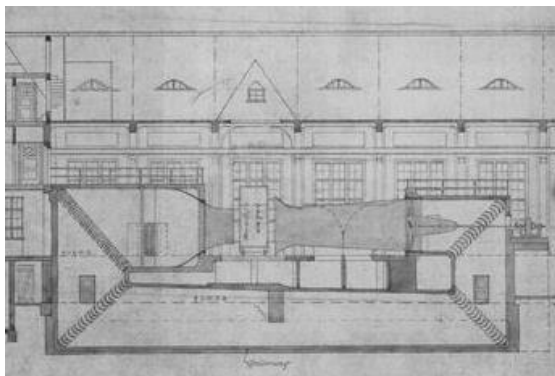
- De Göttingen ou de Prandtl. O ar percorre um circuito fechado (Figura 2.4), devendo-se a Prandtl a sua conceção. O LMFTA encontra-se equipado com um túnel aerodinâmico desta tipologia. Estes túneis acarretam maiores custos de operacionalidade.

A título de curiosidade, apresenta-se na Figura 2.5 o maior túnel aerodinâmico do mundo jamais construído, localizado na Califórnia, EUA, pertencente à NASA. O complexo permite que sejam possíveis configurações diferentes para o tipo de túnel a utilizar, sendo possível funcionar como túnel em circuito fechado e circuito aberto.

O túnel do tipo Eiffel é mais utilizado do que o de sopros, devido ao seu sistema de ventilação estar instalado após a secção de trabalho, pelo que não introduz turbulência na zona de testes, produzindo um escoamento com melhor qualidade. No entanto, motivado pelo facto de a



zona de testes se encontrar em «subducção», o ar exterior entra dentro do túnel proveniente das arestas das juntas e frinchas dos componentes que o constituem. Por esse facto, o ar que penetra na instalação irá perturbar o escoamento no seu interior, especialmente junto às suas paredes.



**Figura 2.4 – Projeto original do túnel de Ludwig Prandtl de 1907, a construir na cave de um edifício [Max-Plank-Gesellschaft, 2016]**



**Figura 2.5 – Ames Research Center da Nasa, inaugurado em 1958, é o maior túnel aerodinâmico do mundo [Nasa, 2008]**

Por outro lado, devido ao facto do ventilador se encontrar a montante da secção de trabalho, o túnel aerodinâmico de sopro «imprime» uma maior pressão na secção de testes do que a pressão atmosférica, pelo que o ar é forçado a sair pelas fendas existentes nos componentes que o constituem. Deste modo garante-se que não se perturba consideravelmente o restante escoamento no interior do túnel. Em todo o caso, este efeito influencia bastante menos a qualidade do escoamento interior do que a turbulência gerada pelo ventilador.

Existem vantagens e desvantagens em ambas as concepções para os túneis aerodinâmico (Brusca et al., 2011):

- Os de circuito aberto apresentam menores custos de construção e permitem visualizar o escoamento usando fumos sem necessidade de purgar o túnel. As desvantagens são de que é necessário montar um elevado número de redes de alisamento de escoamento de forma a obter um escoamento de elevada qualidade, necessita de maior quantidade de energia para o funcionamento do túnel e produz mais ruído;
- Os de circuito fechado criam um escoamento de qualidade mais elevada, independentes de quaisquer condições e atividades que ocorram no espaço onde o túnel se encontra instalado. Requerem menos energia comparativamente com os túneis de circuito aberto e produzem menos ruído. Têm como desvantagem possuírem elevados custos de construção e de ser necessário instalar um purgador de fumos e um permutador de calor após a zona de testes.

Apesar de tudo, o túnel que será desenvolvido, de entre os diversos modelos apresentados anteriormente, será o túnel de circuito aberto do tipo de sopro, de baixa velocidade, motivado principalmente pelo facto de o LMFTA possuir já um ventilador radial que se encontra disponível.

### 2.1.2 Túnel instalado no LMFTA

O Laboratório de Fluidos e Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da faculdade, como já foi referido, possui já um túnel aerodinâmico subsônico de grandes dimensões de circuito fechado, com uma secção de trabalho de  $1000 \times 1500 \text{ mm}^2$ . Está equipado com 3 ventiladores axiais, sendo o central de velocidade variável, enquanto os outros dois podem funcionar em dois níveis de potência: de 750 e 1500 W. Combinados, o escoamento atingir os 30 m/s. Quanto ao convergente do referido túnel, foi projetado tendo por base o mesmo ábaco do estreitamento hidráulico, possuindo as dimensões na secção de entrada de  $3000 \times 2000 \text{ mm}^2$ , pelo que o rácio de áreas da entrada e da saída é de 4. O convergente tem 3020 mm de comprimento, sendo que o ponto de inflexão (medido nas chapas verticais) encontra-se a 1660 mm do início do mesmo, pelo que tem um valor de  $c/L$  sensivelmente de 0,550 – no caso do convergente que se pretende projetar para o nosso caso quer-se que ele seja o mais curto possível.

É de referir como exemplo de um trabalho recente realizado neste mesmo túnel o abordado no artigo de Vaz et al. (2016).

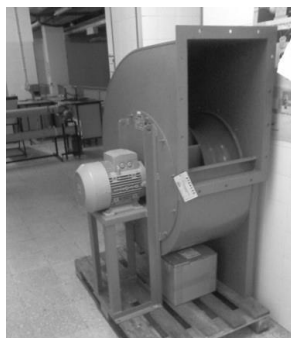
Este túnel, devido ao cuidado que a sua operação requer e custo de operação, não se encontra disponível para a utilização não supervisionada por parte dos estudantes, quer em carácter educativo quer de desenvolvimento de projetos. Com o desenvolvimento da simulação numérica nas últimas décadas muito do trabalho de pesquisa é atualmente realizado computacionalmente. Contudo considera-se uma ferramenta essencial para a formação dos estudantes de engenharia saberem operar com um túnel aerodinâmico no âmbito de estudos aerodinâmicos. É nesse propósito que se encaixa este projeto, para a criação de um pequeno túnel aerodinâmico que suprima esta necessidade educativa, bem como possa ser utilizado com a finalidade de realizar projetos dos alunos pertencentes ao núcleo de mecânica.

### 2.1.3 Descrição dos constituintes do túnel aerodinâmico em desenvolvimento

As descrições dos componentes seguintes dizem respeito aos elementos presentes no anteprojecto do túnel aerodinâmico apresentado na Figura 1.2, da secção 1.1.1.

#### 2.1.3.1 Ventilador

O ventilador já existe no LMFTA. Apesar de representado para melhor compreensão do túnel aerodinâmico no seu conjunto, não será projetado nem modelado, pelo que não é do âmbito deste projeto simular o escoamento no seu interior. É um ventilador radial da marca METEC/F.lli Ferrari, Modelo FR-631 N4A, sendo por esse motivo o túnel aerodinâmico a construir de Sopro. O ventilador possui um variador de velocidades Siemens de 7,50 kW de 4 pólos e 50 Hz. A velocidade máxima do escoamento à sua saída é de 20 m/s. Possui uma secção de saída de  $635 \times 448 \text{ mm}^2$ . Atendendo à configuração dissimétrica e ao tipo de ventilador, o escoamento produzido por este componente será completamente caótico.



**Figura 2.6 – Ventilador disponível no LMFTA para utilização no túnel aerodinâmico didático (modelo METEC/F.Ili Ferrari)**

### **2.1.3.2 Sinobloco**

O sinobloco será montado na base do ventilador, terá dois propósitos. Deve elevar a cota do centro da secção de saída de 1122 mm para 1200 mm em relação ao solo, pelos motivos ergonómicos mencionados na secção 1.1.1. Deverá também absorver em grande medida as vibrações geradas pelo ventilador, evitando que estas se propaguem através do pavimento à restante estrutura metálica que constitui o túnel aerodinâmico.

### **2.1.3.3 União flexível**

União elástica muito flexível, ou uma tela, que promove a ligação entre o ventilador e o difusor. Tem também a função evitar a propagação direta das vibrações mecânicas provenientes do ventilador em funcionamento à restante estrutura metálica do túnel.

### **2.1.3.4 Difusor**

Este elemento consiste numa conduta divergente que efetua a ligação da união flexível até à câmara de tranquilização. O seu objetivo basal não é aumentar a pressão estática. É possibilitar a introdução, a jusante, um convergente, que irá diminuir a intensidade turbulenta do escoamento, que vem muito perturbado à saída do ventilador. É pois, necessário, um difusor para concretizar o aumento de área. Contudo, o aumento da área sem a ocorrência de separação nas faces do difusor, requeria ângulos muito pequenos, sendo que o seu dimensionamento mais pormenorizado deverá ser abordado em trabalhos futuros. Mehta e Bradshaw (1979) aconselham que o ângulo de inclinação das paredes do difusor em relação ao eixo longitudinal seja inferior a cerca de 5° e, segundo Roque e Mendes (2012), é essencial que o processo de aumento de pressão estática tenha uma boa eficácia por forma a evitar as perdas de carga associadas a uma eventual separação da camada limite das paredes do difusor.

Uma técnica, que permite o uso de difusores substancialmente mais curtos, consiste em introduzir uma perda de carga à saída do difusor, utilizando geralmente uma rede de porosidade adequada. A montante da rede, a pressão tem de aumentar, para que o escoamento possa «vencer» a perda de carga. Para tal, a velocidade tem de diminuir, o que se traduz num afastamento das linhas de corrente dentro do difusor. Se bem implementado, o efeito final desta técnica é um escoamento sempre aderente às paredes, e em desaceleração. Com uma escolha adequada da porosidade da rede e da razão de áreas do difusor, consegue-se que a perda de carga

seja moderada (equações 2.1 e 2.2, notar que esta é proporcional ao quadrado da velocidade, o que é favorável nesta questão).

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{4 f L_{eq}}{d} \quad (2.1)$$

$$f_{(Re, \frac{\varepsilon}{d})} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon}{d} \\ Re = \frac{\rho V_{avg} d}{\mu} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

O dimensionamento mais pormenorizado do difusor deverá ser abordado em trabalhos futuros. Será, portanto, necessário determinar os valores dos ângulos das faces do difusor com o eixo longitudinal, a influência do raio do boleado (sendo este opcional) a aplicar nas arestas da secção de entrada do divergente, assim como a influência da porosidade da rede de redução de turbulência no escoamento e a perda de carga associada à mesma. O dimensionamento (observar as Figuras 7.29 e 7.30) deve ser realizado com o propósito do difusor possuir o menor comprimento possível, por motivos de economia de espaço.

#### 2.1.3.5 Câmara de tranquilização

Após o difusor encontra-se a câmara de tranquilização. Possui uma secção constante de área elevada, de modo a permitir uma perda de carga reduzida, devido à reduzida velocidade do escoamento nos elementos de redução de turbulência, não desperdiçando desnecessariamente energia do escoamento. A secção deste componente será definida qual o melhor rácio de área entre as secções de entrada e de saída do convergente – 4:1 ou 9:1. A sua secção deverá ser quadrada para permitir a montagem do convergente em diferentes posições.

A câmara de tranquilização pode conter «favos de abelha», para direccionar o escoamento, reduzindo a sua tridimensionalidade, ou as redes, referidas na secção 2.1.3.7, que incutem perda de carga no escoamento. O efeito destes dois componentes é reduzir o nível de turbulência no escoamento, gerada pelo ventilador que, ao contrário do ideal, não possui um número infinito de pás, através da quebra de turbilhões de grandes dimensões em turbilhões de dimensões menores (Lastra et al, 2013). A função dos «favos de abelha» é eliminar qualquer componente transversal do escoamento (Brusca et al., 2011). Os fundamentos que permitem explicar a fenomenologia do processo de redução de turbulência no escoamento são aprofundados na secção 2.1.6.

A criação da *User Defined Function* tem por objetivo recriar o efeito de perda de pressão no fluido aquando a sua passagem pelos elementos referidos no capítulo anterior, concebidos para quebrar os vórtices, diminuindo o comprimento característico dos turbilhões presentes no escoamento médio, diminuindo a turbulência. A existência no túnel aerodinâmico da rede a montante do convergente condiciona as suas condições de funcionamento, bem como as condições de operabilidade do túnel. Para além do efeito da redução da turbulência do escoamento, será criado o efeito colateral da introdução de uma perda de carga localizada. O objetivo da *UDF* criada é poder ser empregue em trabalhos futuros para o estudo mais aprofundado destes elementos, incluindo o seu dimensionamento.

### 2.1.3.6 «Favos de Abelha»

Elemento direcionador de escoamento. Segundo Prandtl (1933) os «favos de abelha» (*honeycomb*) ao possuírem as suas células alinhadas com a direção do escoamento permitem reduzir as variações de flutuação na velocidade transversal. Os «favos de abelha» possuem pouco efeito sobre a velocidade de escoamento devido ao facto da queda de pressão ao longo destes ser pequena.

Os fatores-chave no dimensionamento dos favos de abelha são o seu comprimento (longitudinal), o diâmetro hidráulico das células e a sua porosidade (Mehta e Bradshaw, 1979). A porosidade ( $\beta_f$ ) é definida pela razão da área da secção livre para o escoamento e a real área da secção (equação 2.3).

$$\beta_f = A_{escoamento} / A_{total} \quad (2.3)$$

A colocação de «favos de abelha» e complementarmente da rede, tem por objetivo obter um perfil de velocidades uniforme (ou seja um *smooth flow*). Os «favos de abelha», consistem num conjunto de condutas de pequena secção, colocadas ao longo do eixo principal do escoamento. Eles terão o aspeto representado na Figura 2.7.

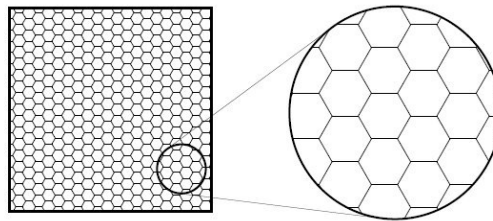


Figura 2.7 – Detalhe da representação esquemática de «favos de abelha».

Supondo um caso em que o diâmetro do tubo é preenchido por  $N$  hexágonos, estes funcionam como tubos de diâmetro  $N$  vezes menor que a conduta de secção inicial. Assim a dimensão máxima dos vórtices que podem existir no seu interior será  $1/N$  dos que poderiam existir na conduta inicial. Não permitem a existência de grandes filamentos de turbulência devido à sua reduzida secção.

Os «favos de abelha» permitem assim orientar o escoamento oriundo do ventilador de acordo com a direção longitudinal do convergente e minimizar as componentes de velocidade transversais. No entanto o facto de os «favos de abelha» serem constituídos por tubos de diâmetro pequeno significa que o escoamento apresentará perdas de carga mais elevadas (determinável pelas equações 2.2 e 2.3).

### 2.1.3.7 Rede

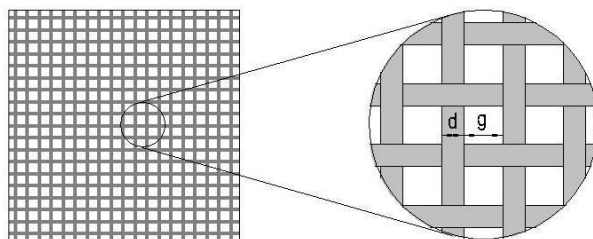
A rede de redução de turbulência impõe, além de um efeito de alisamento de escoamento, um efeito de perda de carga bastante mais predominante para o caso do nosso túnel aerodinâmico. Segundo Prandtl (1933) o propósito da rede (*screens mesh*) é principalmente reduzir as flutuações de velocidade, com pequeno efeito na direção do escoamento. Demonstrou também

que a montagem de redes em série com diferentes espaçamentos entre a malha (grosseira, média e fina) é mais eficiente do que a montagem de apenas de um tipo de malha.

Para além do propósito explicitado anteriormente, a rede pode ter também um efeito de redução da dimensão dos vórtices presentes no escoamento, com dimensão acima da dimensão  $g$ , da «célula» da rede, representada na Figura 2.8. A descrição dos fenómenos que levam a que a rede «quebre» os turbilhões presentes no escoamento a montante desta, resultando turbilhões de comprimentos característicos menores, é realizada com mais pormenor na secção 2.1.6.

Os níveis de intensidade turbulenta do escoamento do túnel são principalmente controlados pelos painéis de rede de alisamento de escoamento introduzidos, sendo que cada painel adicional reduz os níveis de turbulência verificados para metade (Barlow et al., 1999, como citado em Leifsson e Koziel, 2015).

Segundo Mehta e Bradshaw (1979), por forma as redes reduzirem eficazmente a turbulência, devem possuir uma porosidade no intervalo de 0,58 a 0,80. Redes com porosidade acima de 0,80 não são adequados para um bom controlo da turbulência, enquanto valores inferiores a 0,58 criam instabilidade no escoamento. “A densidade de malha das redes é definida como a razão entre o número de fios e o comprimento lateral da secção da câmara em que as redes são inseridas” (Barlow et al., 1999, como citado em Brusca et al., 2011).



**Figura 2.8 – Detalhe das proporções entre a espessura ocupada pelos fios da rede e o espaço livre para o escoamento.**

Para determinar a opacidade da rede será necessário investigar a relação de tamanho entre as dimensões  $d$  e  $g$ , representadas na Figura 2.8. A perda de carga localizada, criada pela rede (equações 2.1 e 2.2), esta relacionada com estas dimensões. Será de esperar uma redução bastante significativa dos níveis de turbulência no escoamento médio devido à implementação das redes. A rede não evitará que ocorra separação nas paredes do convergente, influenciada pelo desenvolvimento de uma camada limite turbulenta junto destas, pelo que o estudo do contorno é fundamental.

### **2.1.3.8 O Convergente**

Por fim será montado o convergente, constituinte de grande importância para garantir um escoamento uniforme na secção de trabalho pois é o último componente antes da secção de teste. O convergente tem por objetivo acelerar o escoamento desde a câmara de tranquilização até a secção de teste, proporcionando uma velocidade constante ao longo de toda a secção de medições (Brusca et al., 2011) e alinhada com o seu eixo longitudinal. As dimensões e o formato

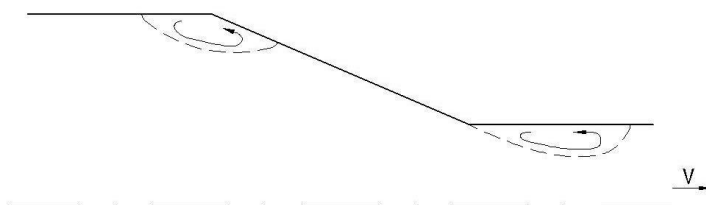
do convergente têm influência sobre a qualidade do escoamento na secção de saída do túnel aerodinâmico (Derbunovich et al, 1987). É portanto um componente crítico no túnel aerodinâmico para proporcionar um escoamento de elevada qualidade na secção de testes (Barlow e Era, 1999 como citado em Leifsson e Koziel, 2015) e de reduzida intensidade turbulenta.

Com vista a permitir que o convergente seja afixado em posições distintas à câmara de tranquilização (bastando rodar o convergente 90° segundo o seu eixo longitudinal) não deve ter associado a si apoios de preferência. Se a sua colocação for imperativa, deverá ser pensada cuidadosamente para permitir as duas posições de montagem.

A determinação da sua geometria é a mais crítica do projeto, não apenas por se encontrar imediatamente a montante da secção de testes, mas porque a montante do convergente encontram elementos dedicados à redução de turbulência. Não se pretende introduzir pois turbulência de qualquer tipo no escoamento alisado anteriormente. Por esse motivo a sua geometria deverá ser minuciosamente estudada por forma a não gerar separações no escoamento e bolhas de recirculação. Nesse sentido discute-se no subcapítulo seguinte quais as melhores formas de definir a geometria do convergente.

#### 2.1.3.8.1 Definição do contorno

A geometria do convergente é bastante crítica pelas razões mencionadas. No caso de ser constituído por troços retilíneos (Figura 2.9) o túnel apresentaria arestas transversais ao escoamento salientes. Nesta situação o escoamento teria dificuldade em acompanhar a superfície, promovendo a criação de zonas de recirculação, geradoras de vórtices, causando no aumento da turbulência no escoamento.

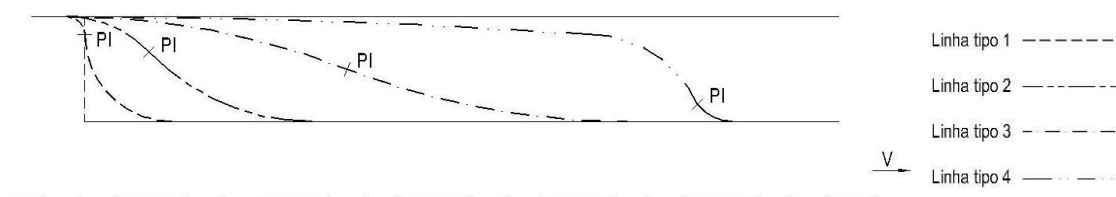


**Figura 2.9 – Esquema de recirculações geradas num convergente retilíneo**

Portanto a geometria do convergente deve ser suave para acompanhar as linhas de corrente do escoamento. Uma forma que se assemelha à pretendida é a descrita pelas equações polinomiais de 3.º grau (Levin, 1968), sendo que para a determinação destas implica considerar como condições fronteira, nos extremos relativos à secção de entrada e de saída, as derivadas de primeira ordem nulas. No entanto, existem ainda diversos modos possíveis de ajustar estas equações ao contorno do convergente.

O convergente em termos de comprimento deve ser curto de modo a minimizar o crescimento da camada limite (CL) e o escoamento à sua saída deve ser simultaneamente uniforme e estável (Mathew et al., 2005). É portanto necessário determinar qual o comprimento mínimo admissível para o convergente sem que ocorra a separação do escoamento, devido à curvatura acentuada do convergente, devendo ser evitada a todo o custo (Cattafesta et al., 2010).

Se a redução da secção for demasiado acentuada (como caso representado mais à esquerda na Figura 2.10, linha do tipo 1) cria-se um estrangulamento que promove um escoamento secundário indesejado junto do ponto anguloso formado, tal como se de um degrau se tratasse. No entanto se o convergente for suficientemente alongado, seguindo um polinómio de 3.º grau, com um PI mais afastado da secção de entrada, o escoamento obtido é mais uniforme (casos das linhas do tipo 2 e 3). Já para o caso em que o PI surge mais junto à secção de saída (caso mais à direita, com a linha do tipo 4), verifica-se presumivelmente o mesmo problema que o referido para o primeiro caso, um efeito de degrau abrupto, mas neste caso próximo à saída do convergente.



**Figura 2.10 – Representação dos contornos possíveis para a redução de secção no convergente**

Em todas as geometrias representadas na Figura 2.10, a nível do escoamento médio o gradiente de pressão é favorável em todas elas (presumivelmente), sendo propício a evitar a formação de escoamentos secundários ou recirculações. No entanto, pretende-se descobrir se esse gradiente por ventura não sofre variações localmente, junto da parede do convergente onde a acontecer os seus efeitos são mais importantes para o seu estudo.

Pensa-se que o elemento fulcral para proporcionar um escoamento mais uniforme se deva ao facto da geometria do convergente ser a mais suave possível de forma a acompanhar as linhas de corrente do escoamento – motivo pelo qual é descrita por funções polinomiais de 3º grau. Desta forma, aliado com o gradiente de pressão favorável, constituiria uma ferramenta adicional de quebra de possíveis vórtices que entretanto possam surgir no escoamento. Pretende-se responder a estas questões através do estudo realizado neste trabalho.

A geometria dos convergentes que apresentará melhores resultados será provavelmente a que possui a redução da área de secção ao longo de um maior comprimento axial (mas sem nunca se aproximar do caso da linha do tipo 4), pois é previsivelmente a geometria que menos perturba o escoamento. É portanto de esperar que a localização preferencial do PI se situe a meia distância das secções de entrada e de saída, permitindo um declive menos pronunciado da superfície do contorno (linha do tipo 3). Intuitivamente julga-se ser esta a situação que apresenta o melhor escoamento, pois caso o PI se localize próximo da saída do convergente – tal como no contorno representado mais à direita na Figura 2.10 – esse ponto anguloso ocorre numa secção em que a velocidade do escoamento é também mais elevada. Assim, o escoamento que acompanha a curvatura da superfície ao possuir uma velocidade maior, mais dificilmente consegue acompanhar o contorno, pelo que a tendência para que o escoamento se separar nesse ponto é maior.

De lembrar que a secção de retangular de saída do convergente tem como dimensões das arestas laterais 400 e 600 mm. É de esperar que a redução do diâmetro de entrada ( $D_0$ ) para



o de saída ( $D=400$  mm) introduza mais flutuações de vorticidade no escoamento do que o verificado entre o mesmo  $D_0$  um  $D$  de 600 mm. Considera-se o escoamento decorrente da face do convergente associado à aresta de 400 mm seja mais crítico, no caso do convergente de secção retangular para o túnel aerodinâmico. Assim as dimensões das simulações realizadas tomaram como diâmetro de saída o valor de 400 mm, por forma a retratar da melhor forma este mesmo caso.

#### 2.1.3.8.2 Definição do rácio de áreas

Outro parâmetro de projeto necessário definir é o rácio de áreas existente entre a secção de entrada e a de saída do convergente. O rácio de áreas entre a secção de entrada e de saída do convergente deve de ser “o mais elevado possível” por forma a reduzir a perda de pressão criada pela passagem do escoamento nas redes de alisamento de escoamento montadas na câmara de tranquilização (Brusca et al., 2011).

Na literatura são apresentados alguns valores indicativos para a razão de áreas: segundo Mathew (et al., 2005) o rácio deverá aproximar-se de 8:1; Bell e Mehta (1988) defendem um intervalo entre 6 a 10 para 1 – rácios de áreas superiores a 10 levam a dimensões de entrada excessivas, enquanto rácios inferiores a 6 produzem perdas de carga elevadas no escoamento ao atravessar os elementos de redução de turbulência.

De entre as possibilidades, as que aparentam uma relação mais harmoniosa para serem aplicadas ao nosso caso são os rácios de áreas 4:1 e 9:1 – pela relação igualmente simples entre aos valores dos diâmetros de entrada e de saída destes casos. Desta forma, de entre as duas opções por nós consideradas, a literatura sugere que a melhor se centra em torno do rácio 9:1. Ainda assim pretende-se obter alguma indicação nesse sentido, através da análise comparativa entre os dois casos através do estudo a realizar.

#### 2.1.3.8.3 Expressões matemáticas

O projeto mecânico de túneis aerodinâmicos é uma área bem estabelecida, existindo inúmeros estudos na literatura acerca do dimensionamento dos seus constituintes (Bell e Mehta, 1988, 1989; Mehta e Bradshaw, 1979; Morel, 1975, 1977; Cermak e Cochran, 1992; Cermak, 2003; Hansen e Sørensen, 1985; Niemann, 1993; Schatzmann et al., 1995; Stathopoulos, 1984). No entanto têm surgido novos estudos que procuram otimizar especialmente o contorno dos convergentes (Lastra et al., 2013; Leifsson e Koziel, 2015).

Os efeitos da forma do contorno sobre o escoamento são altamente não lineares, pelo que é necessário recorrer à dinâmica dos fluidos computacional (*CFD*) para tomar decisões acerca do formato do convergente (Leifsson e Koziel, 2015).

Existem diversos modelos matemáticos que podem ser usados para determinar o *layout* de um convergente para um túnel aerodinâmico. Os contornos vastamente dispersos na literatura e recomendados para este tipo de aplicação são baseados em um par de polinómios cúbicos (Bell e Mehta, 1989; Morel, 1975, 1977; Ramaseshan e Ramaswamy, 2002)

Não obstante encontram-se dispersos na literatura diversas formas de obter matematicamente a silhueta do convergente: perfis polinomiais de 4ª ordem, de 5ª ordem, perfil de derivada logarítmica (Rodríguez Lastra et al., 2013), perfil obtido através de curvas de Bézier (Leifsson e Koziel, 2015); etc.

Segundo Mehta e Bradshaw (1979) as características mais significativas para um bom projeto de um convergente de um túnel aerodinâmico são a redução das variações da velocidade média e das suas flutuações, e aumento da velocidade média de escoamento. Portanto os objetivos da análise de um convergente devem consistir em evitar a separação da CL, procurar obter um escoamento o mais uniforme possível e com níveis mínimos de turbulência na secção de saída.

### 2.1.4 Ábaco do estreitamento hidráulico de Levin

É nesse sentido que este trabalho pretende contribuir na geração de conhecimento científico. Estuda-se a geometria do convergente tendo por base um ábaco pouco mencionado na literatura, por Levin (1968), pelo que poderá ser interessante explorá-lo (Figura 2.11). Uma figura de melhor resolução é apresentada no Anexo (Figura 8.1).

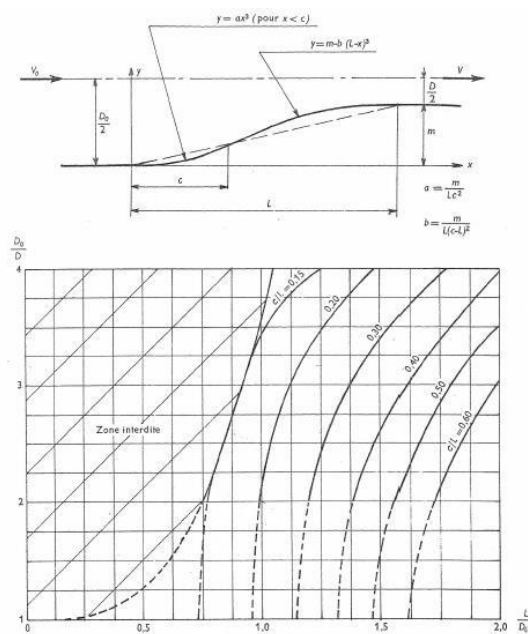


Figura 2.11 – Aspeto do ábaco do estreitamento hidrodinâmico [Levin, 1968]

O nosso objetivo é analisar o ábaco do estreitamento hidrodinâmico, desenvolvido para casos de redução da área da secção circular de condutas, que identifica geometrias permitidas e interditas, no sentido de causarem perturbações indesejáveis no escoamento. A intenção é utiliza-lo como primeira aproximação para a silhueta do convergente os dados experimentais de Levin para projetar da melhor forma o contorno do convergente e validar o método dos volumes finitos utilizado pelo software ANSYS FLUENT®, utilizado na simulação numérica.

Para o estudo do ábaco, relativo a condutas axissimétricas, deverá recorrer-se a simulações bidimensionais. Os resultados obtidos serão equivalentes aos obtidos para o caso 3D, com a vantagem de serem menos dispendiosos computacionalmente. De modo a aproveitar as simulações 2D realizadas para o estudo do ábaco, deverão ser retiradas ilações para a geometria tridimensional do convergente a instalar no túnel aerodinâmico. Para isso é necessário encontrar

a melhor forma de estender as conclusões obtidas com o estudo do ábaco para condutas não axissimétricas.

As variáveis associadas ao ábaco que controlam a forma do contorno de um qualquer convergente são: os diâmetros de entrada ( $D_0$ ) e de saída ( $D$ ) do convergente, o comprimento axial do convergente ( $L$ ) e a distância axial entre a secção de entrada e a secção onde se encontra o ponto de inflexão do contorno ( $c$ ). O valor de  $m$ , obtido pela diferença de raio entre a secção de entrada e a de saída, pode-se considerar como uma variável dependente de  $D_0$  e de  $D$ .

Qualquer convergente pode ser definido através das razões adimensionais entre o diâmetro de entrada e o de saída ( $D_0/D$ ) e a razão entre o comprimento do convergente e o diâmetro de entrada ( $L/D_0$ ) ou a razão entre a distância do PI à secção de entrada e o comprimento do convergente ( $c/L$ ). De notar que o próprio ábaco é restritivo quanto à localização do PI definida pelo valor de  $c$ . Com o aumentar de comprimento do convergente obriga que o PI se afaste gradualmente da secção de entrada e se aproxime da secção de saída, enquanto simultaneamente obriga também a que o convergente aumente de comprimento.

O ábaco a acompanhar os dados experimentais recolhidos apresenta representadas as isolinhas  $c/L$ . Desconhece-se se estas possuem algum significado relativamente à qualidade do escoamento verificado. Por esse motivo serão alvo de estudo diversos valores de  $c/L$ .

De ressaltar que os resultados obtidos por Levin, além de realizados em condutas circulares, têm por base, muito provavelmente, estudos em líquidos<sup>2</sup>. Por este facto, desconhece-se ao certo a influência que o número de Reynolds do escoamento terá sobre as curvas do ábaco representadas na Figura 2.11.

Visto se estarmos interessados em economia de espaço no laboratório onde o túnel será instalado, existe preferência por valores pequenos de  $c/L$ . Por outro lado, outra preocupação constante é que o convergente apresente um escoamento sem recirculações e a menor perda de carga possível, pelo que seria interessante quantificar em que medida compensa um convergente bastante curto.

---

<sup>2</sup> Desconhece-se ao certo, por falta de informação, qual o fluido empregue nas medições experimentais de Levin. No entanto tudo levar a quer que este estaria interessado em investigar condutas para o transporte de petróleo ou seus derivados.

## 2.1.5 Camada limite

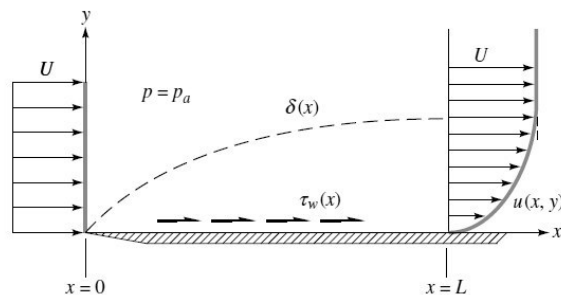
Nesta secção são revistos alguns conceitos acerca da camada limite, o seu estudo segundo a teoria da placa plana, o efeito dos gradientes de pressão e o fenómeno que sucede ao escoamento em contrações abruptas.

### 2.1.5.1 Teoria da placa plana e parâmetros de estudo

Este subcapítulo é especialmente importante pois permite identificar métricas que permitem comparar objetivamente, contornos de convergentes distintos, identificando o formato mais interessante do ponto de vista do escoamento na câmara de teste do túnel aerodinâmico.

A análise da teoria da camada limite permite estudar os efeitos viscosos que ocorrem em escoamentos próximos a paredes sólidas. No entanto não existe uma teoria simples para a análise de escoamentos externos para valores de Reynolds compreendidos entre 1 e 1000 (White, 2011). Apesar de o escoamento estudado neste trabalho não se tratar de um escoamento externo, nas proximidades das paredes do convergente considerou-se como tal, para fins de utilização de parâmetros de análise da CL. Os estudos computacionais efetuados para os diversos convergentes, demonstram que o número de Reynolds não ultrapassa os 700, tratando-se portanto de escoamentos com camadas de corte espessas.

De modo a analisar os perfis de velocidades entre os diversos convergentes a comparar pode-se usar os diversos parâmetros associados à CL de forma a constituírem um método de comparação. Os parâmetros da teoria da camada limite úteis para o estudo deste trabalho são os seguintes: espessura da camada-limite ( $\delta$ ), espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ), espessura de quantidade de movimento ( $\theta$ ) e fator de forma do perfil ( $H$ ).



**Figura 2.12 – Placa plana: espessura da CL e tensões tangenciais geradas na superfície [White, 2011]**

Apesar dos convergentes a estudar nesta tese consistir em condutas de secção circular, considerou-se como se de uma placa plana se trata-se para efeitos de cálculo dos diversos parâmetros. Em bom rigor, dever-se-ia adaptar as equações conhecidas de  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$  da placa plana para o interior de condutas, para um domínio em forma de coroa tubular. No entanto considerou-se que não seria necessário, devido ao raio da conduta possuir uma dimensão bastante elevada em relação à espessura da CL ( $\delta$ ), pode-se considerar que o escoamento decorre sobre uma placa plana. Desta forma é possível aplicar diretamente as expressões apresentadas para os parâmetros, sendo eles apresentados no subcapítulo seguinte.

Para escoamentos exteriores, define-se a espessura da camada limite  $\delta$  como o lugar geométrico dos pontos em que a velocidade paralela à placa ( $u$ ) atinge os 99% da velocidade do escoamento livre ( $U$ ) (Figura 2.12). No caso deste estudo, a velocidade  $U$  diz respeito à velocidade do escoamento médio.

A espessura de deslocamento da camada-limite  $\delta^*$  (equação 2.4) é a distância que o perfil uniforme de velocidades teria que se distanciar em relação à superfície de forma a se respeitar a conservação de massa (Figura 2.11). Por outras palavras é a distância que as linhas de corrente externas devem defletir de forma a satisfazer a conservação da massa entre a entrada e a saída. Assim o valor de  $\delta^*$  traduz o efeito de deslocamento das linhas de corrente externas.

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.4)$$

Quanto menor o valor de  $\delta^*$  de um perfil de velocidades, mais cheio se diz o perfil, o que indica que o perfil será mais uniforme. A existência de um perfil mais cheio é igualmente indicadora de uma menor probabilidade do escoamento sofrer recirculações.

A espessura da quantidade de movimento  $\theta$  é uma medida da dissipação da quantidade de movimento devido a tensões de corte, pelo que se trata de uma medida de arrasto total da placa (equação 2.5). É indicadora da quantidade de energia do escoamento dissipada para a superfície do corpo, no nosso caso, para a parede do convergente. Pretende-se que seja a menor possível por forma a ser dissipada a menor quantidade de energia do escoamento, mantendo-se o escoamento o mais energético possível.

$$\theta = \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.5)$$

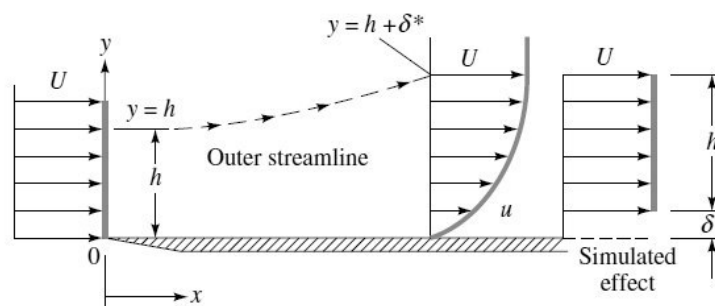
O fator de forma do perfil  $H$  é um número adimensional que traduz o grau de esvaziamento de um perfil de velocidades, de modo que um grande fator de forma indica que a separação da camada-limite está prestes a ocorrer.

$$H = \delta^* / \theta \quad (2.6)$$

Para a teoria da placa plana, assume-se que a separação em escoamentos turbulentos ocorra para valores de  $H$  entre 1,8 e 2,4. Contudo noutras situações, o seu valor aumenta rapidamente próximo da secção em que ocorre separação, diminuindo de seguida. Em ambos os casos a separação ocorre no ponto em que se verifica o maior valor de  $H$  (Cebeci, 2004). Para este método é necessário conhecer os perfis de velocidades por forma a serem utilizadas nos cálculos, tornando-se assim num bom método para aplicar a partir de resultados de simulações numéricas.

O valor do fator de forma é um indicador da qualidade do escoamento, não deve ser encarado de forma determinística em relação à existência ou não de separação no escoamento. É uma medição do grau de enchimento (valores de  $H$  baixos) e esvaziamento (valores de  $H$  elevados) do perfil de velocidades.

Deste modo é possível afirmar que no estudo de comparação dos diferentes convergentes, os contornos preferíveis serão aqueles que possuem os valores mais baixos relativos aos parâmetros  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ . Valores mais baixos são sinónimos de escoamentos mais uniformes, energéticos e com menores probabilidades de apresentarem separações e recirculações.



**Figura 2.13 – Placa plana: espessura de deslocamento [White, 2011]**

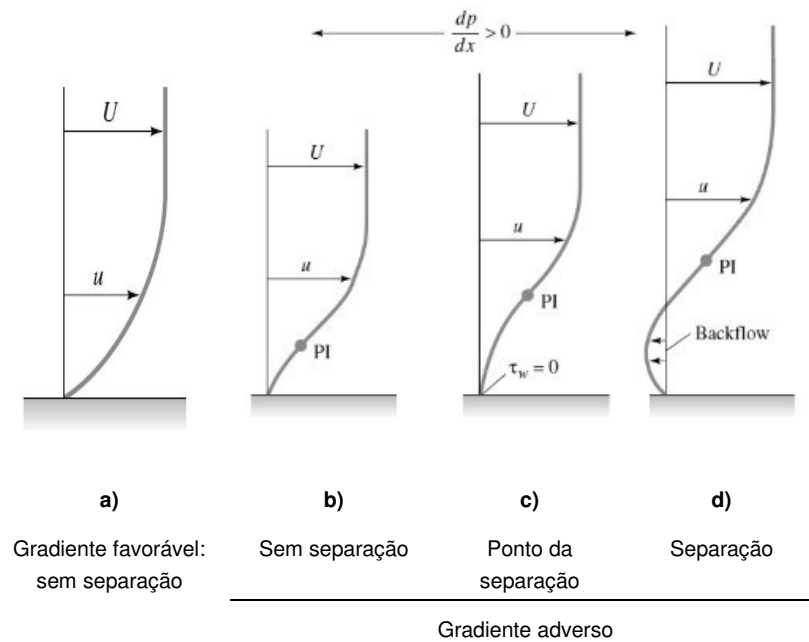
No nosso caso visto que o escoamento se desenrola numa conduta ao invés de uma placa plana, o critério usualmente definido como determinístico da espessura da camada limite, como sendo a localização do fluido que possui velocidade inferior a 99% da velocidade do escoamento livre, não se aplica da melhor forma para o escoamento médio no interior de um tubo. Isto porque ao termos uma área de passagem do fluido mais «restringida» de certa forma pela existência da CL, a velocidade do escoamento junto ao eixo de simetria da conduta irá acelerar para compensar a redução de velocidade junto às paredes, de forma a manter o caudal. Dessa forma será utilizado outro critério, definido nos Apêndices, a partir da página 127: Determinação das espessuras da camada limite.

No entanto é necessário cautela quanto aos resultados obtidos, pois existem algumas razões possíveis para que eles nos possam induzir em erro. Escoamentos com número de Reynolds elevado são muito mais acessíveis a um tratamento de CL do que em escoamentos para  $Re$  baixos (White, 2011). Os casos estudados aparentam valores de  $Re$  relativamente baixos – na ordem de 700 – pelo que a grande presença de efeitos viscosos poderá diminuir a aplicabilidade da teoria da placa plana. Por esse motivo, é necessário complementar o estudo do escoamento com critérios adicionais.

### 2.1.5.2 Gradientes de pressão

O conceito do gradiente de pressão acerca de um escoamento sobre uma superfície é um conceito necessário para a interpretação e correta análise dos perfis de velocidades obtidos neste trabalho. Um dos fenômenos que se pretende evitar é a ocorrência de recirculações junto às paredes do contorno do convergente. Nesse sentido é importante compreender o porquê e como esse fenômeno se desencadeia e como o evitar.

Na Figura 2.14 apresentam-se diversos perfis de velocidades possíveis de ocorrer no escoamento junto a superfícies sólidas, desde os perfis mais cheios e energéticos, passando pelo esvaziamento do perfil até se verificar a existência de recirculação. Pode-se constatar a existência de um perfil de velocidades cheio para condições em que o gradiente de velocidades é positivo, como é o caso que se verifica no convergente que estamos a estudar, onde em toda a sua extensão se pretende um gradiente de pressão negativo devido ao estreitamento do seu contorno. Não obstante pretende-se verificar se ocorre esvaziamento do perfil, quais as zonas mais críticas à ocorrência deste fenômeno e quantificar quão grave este é.



**Figura 2.14 – Efeito do gradiente de pressão sobre o perfil de velocidades do escoamento junto a uma superfície sólida [White, 2011]**

Existem diversas formas de observar os resultados por forma a interpretar, com que tipo de escoamento nos deparamos, de entre os apresentados na Figura 2.14, entre eles: a observação direta do perfil de velocidades, estudo do sinal do gradiente de pressão (se este é adverso ou favorável) e o estudo da tensão de corte na superfície. Para este último caso, como é possível observar pela Figura 2.14 c), à medida que o perfil de velocidades é esvaziado a tensão de corte junto à parede sólida diminui, sendo um requisito necessário esta atingir um valor nulo ( $\tau_w = 0$ ) antes que ocorra a separação do escoamento. Assim um valor de tensão de corte próxima de zero na superfície sólida é mais um indicador do perfil de velocidades se encontrar prestes a separar.

### 2.1.5.3 Contração abrupta

Associado à separação do escoamento devido à contração abrupta de diâmetro numa conduta, surge o efeito a que se dá o nome de *vena contracta*. Nestes casos a separação do escoamento no tubo a jusante provoca a contração da secção de passagem do escoamento principal. Surge desta forma uma secção de diâmetro mínimo, após o estrangulamento da redução de diâmetro da conduta, como representado na Figura 2.15.

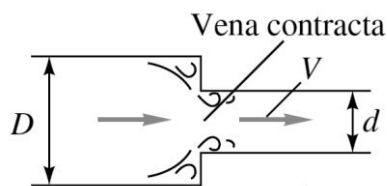


Figura 2.15 – Representação de uma *vena contracta* [White, 2011]

Este fenómeno implica que as linhas de corrente se afastem da parede da condução de diâmetro mais reduzido até se atingir um diâmetro mínimo de passagem, para logo de seguida se aproximarem de novo da parede. Devido à redução da secção de passagem ocorreria uma diminuição da pressão estática do escoamento. As implicações deste fenómeno serão discutidas mais à frente no capítulo Resultados, na secção 4.2.2.1.

### 2.1.6 Fundamentos de turbulência

As descrições desta secção têm maioritariamente por base os conhecimentos adquiridos pela leitura da literatura acerca dos fundamentos da turbulência de Mohammadi e Pironneau (1994), Cebeci (2004) e Tennekes e Lumley (2010).

Os turbilhões, ou vórtices ocorrem numa larga escala de dimensões nos escoamentos turbulentos. As suas dimensões encontram-se limitadas superiormente pela dimensão do campo do escoamento, ou seja, da ordem da secção total disponível para a passagem do escoamento. As escalas de comprimento mais pequenas são limitadas inferiormente pela ação difusiva da viscosidade molecular. O eixo contorcido, em torno do qual o fluido associado a um vórtice roda é apelidado de filamento.

Às escalas de tempo e de comprimento – escalas mais pequenas que ocorrem no movimento turbulento – dá-se o nome de Escalas de Kolmogorov. Segundo a teoria da estrutura de pequena escala, ou teoria do equilíbrio universal de Kolmogorov, o movimento das pequenas escalas – i.e., turbilhões de dimensões mínimas – depende apenas da taxa à qual é «alimentado» com energia do movimento de grande escala e da viscosidade cinemática. Significa isto que a principal fonte de energia dos turbilhões provém do próprio escoamento, criada através do corte produzido pelo escorregamento do fluido sobre si mesmo. Os grandes vórtices de maiores dimensões fornecem, assim, energia aos vórtices com escalas de tempo e de comprimento inferiores, e assim sucessivamente para dimensões cada vez mais pequenas até ao limiar em que a ação difusiva da viscosidade molecular impede a geração de escalas de movimento infinitamente pequenas, dissipando a energia de pequena escala na forma de calor. Associa-se esta forma de transferência de energia a uma cascata, nome pelo qual é conhecida a teoria que explica o processo: cascata de energia.

Para que a turbulência num escoamento se mantenha sem decair, a taxa de fornecimento de energia deve ser no mínimo igual à taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) que está associada ao atrito entre as moléculas do fluido. Por outras palavras, a energia dos turbilhões tem de ser mantida pelo escoamento de corte entre as partículas de fluido dado que, os turbilhões dissipam continua-



mente energia para os turbilhões de escalas mais pequenas. Assim, segundo a lei de Kolmogorov, os turbilhões das escalas mais pequenas não podem sobreviver um longo período de tempo devido à viscosidade, acabando por se dissipar.

A dimensão dos turbilhões das escalas mais pequenas que podem existir no escoamento, denominada microescala, é relevante para definir o grau de refinamento da malha computacional na proximidade das paredes do convergente. A dimensão mínima habitualmente considerada é, em média, cerca de 1 mm. No estudo dos processos finais de dissipação, Kolmogorov deduziu uma escala de comprimento ainda menor, mas substancialmente superior ao percurso livre médio molecular, para os gases, como o ar, é cerca de  $10^{-4}$  mm.

Um dos principais requisitos para um túnel aerodinâmico é o facto de o escoamento produzido na secção de testes ter que ser o mais uniforme possível, apresentando a mínima turbulência. Nesse sentido, o intuito do túnel aerodinâmico é o de reduzir ao máximo a dimensão característica dos vórtices presentes no escoamento, assim como dissipar a energia associada a estes, através da quebra dos seus filamentos. Quanto mais quebrados e reduzidos os filamentos de vorticidade, menor será a energia turbulenta presente no escoamento e mais uniforme será o escoamento médio.

As redes de redução de turbulência de escoamento possuem um papel preponderante na dissipação da turbulência por promoverem bastante a diminuição das escalas de comprimento dos turbilhões existentes no escoamento. Além do efeito de aumento de pressão no interior do difusor, a dimensão linear característica dos vórtices presentes no escoamento é diminuída, resultante da interação do escoamento com a rede (redução da dimensão dos filamentos dos vórtices). Qualquer filamento de vorticidade maior do que o espaçamento existente entre diversos fios que compõem a rede será inevitavelmente quebrado. A rede possui, assim, um efeito potenciador de dissipação de turbulência do escoamento, pois diminui a energia associada aos turbilhões e reduz a sua dimensão a escalas de comprimento em que é possível que estes se dissipem por ação da viscosidade molecular, sob a forma de calor.

Para além disso, também o convergente constitui uma ferramenta de diminuição de turbulência do escoamento produzido. Tendo como função acelerar o escoamento, ao fazê-lo, distende as partículas do fluido presentes no escoamento, bem como alonga os vórtices nele contidos. Este, ao distender os filamentos dos vórtices facilita a sua quebra. Assim, as redes e o convergente do túnel aerodinâmico possuem a capacidade de diminuir o comprimento característico dos vórtices contidos no escoamento. Desta forma, é possível reduzir bastante a turbulência do escoamento, aumentando a tendência de dissipação dos vórtices.

A intensidade turbulenta ( $I_{turb}$ ) é uma medida da quantidade de turbulência presente num escoamento. É obtida através da razão entre as flutuações de velocidade e uma velocidade de referência, habitualmente se considerando a velocidade média do escoamento (Barlow et al., 1999, como citado em Roque e Mendes, 2012), como apresentado na equação 2.7.

$$I_{turb} \equiv u'/u_{ref} \quad (2.7)$$

Habitualmente considera-se intensidades turbulentas inferiores a 1% como sendo baixas, enquanto valores superiores a 10% são considerados elevados. Nos túneis aerodinâmicos modernos de baixa turbulência, o valor de  $I_{turb}$  pode ser tão baixo quanto 0,05% (Fluent, 2011; Leifsson

e Koziel, 2015). Em estudos *CFD* encontrados na literatura, que tinham como propósito criar e estudar o contorno de um convergente, como no estudo levado a cabo por Lastra et al. (2013), são obtidos valores de  $I_{turb}$  de ordens inferiores a 0,7%, enquanto os resultados computacionais obtidos por Leifsson e Koziel (2015) para a  $I_{turb}$  foram entre 1% e 5%. Para os casos em que se verifiquem valores elevados de turbulência na secção de saída dos convergentes é aconselhável adicionar painéis de redes de alisamento de escoamento, por forma a serem alcançados níveis de turbulência desejáveis.

## 2.2 Aspetos de simulações numéricas

### 2.2.1 Equações *RANS*

As equações Navier-Stokes descrevem o escoamento de um fluido viscoso. São equações diferenciais que descrevem no tempo e no espaço o campo de velocidades e de pressão do escoamento, assim como as tensões e massa volúmica do fluido. São complementadas pela equação de conservação da massa. A aplicabilidade destas equações – apelidadas de equações de governo do escoamento – é geral, aplicáveis quer a escoamentos laminares quer turbulentos.

Existem vários métodos computacionais que permitem a resolução das Navier-Stokes. Os métodos intensivos como o Large Eddy Simulations (LES) e o Direct Numerical Simulation (DNS) são rotinas computacionalmente dispendiosas (Cebeci, 2004). Os modelos baseados por sua vez nas Reynolds-Averaged Navier-Stokes (*RANS*) constituem uma aproximação pragmática ao estudo dos escoamentos presentes em engenharia, sendo computacionalmente menos exigentes.

Os escoamentos turbulentos podem considerar-se como processos estocásticos (Tennekes e Lumley, 2010). Assim para o seu estudo das suas variáveis é necessário o conceito de média temporal. O valor «instantâneo» de cada variável é composto pelo seu valor médio e pela sua possível flutuação. Ao se considerar apenas os valores médios das grandezas que constituem as equações de governo do escoamento e as tensões de Reynolds obtêm-se as equações *RANS*. A sua resolução é efetuada através de ferramentas *CFD* e devolve apenas os resultados verificados para a média dos valores considerados para as variáveis do escoamento.

### 2.2.2 Modelos de turbulência

A modelação da turbulência do escoamento é fundamental para a resolução mais correta das equações que governam o escoamento (Navier-Stokes e da continuidade), e consequentemente da qualidade das soluções obtidas. Conhecer as características dos diversos modelos numéricos é assim essencial.

Existem vários modelos de turbulência com o intuito de estudar escoamentos de caracteres diferentes. Os modelos de turbulência devem ser robustos e aplicáveis à maioria dos casos, possuindo elevado nível de fidelidade. Além disso para estudos de engenharia, é essencial que o processo de análise seja económico em termos computacionais, evitando consumos elevados de tempo para a resolução dos casos em estudo.

Como foi referido, as *RANS* consideram o valor médio das variáveis que constituem as equações Navier-Stokes. Devido à aplicação do conceito de média temporal surgem novos termos representativos do efeito da turbulência, apelidados de tensor de Reynolds. Este tensor consiste na correlação entre as flutuações das componentes da velocidade e a massa volúmica (Tennekes e Lumley, 2010). De modo a ser possível fechar o sistema de equações a resolver para a caracterização do escoamento é necessário recorrer a modelos de turbulência que descrevam as tensões de Reynolds.

Entre os vários modelos de turbulência possíveis de serem utilizados na simulação numérica do nosso convergente encontram-se os possivelmente mais indicado ao nosso caso, são os seguintes (Fluent, 2011):

- $\kappa$ - $\epsilon$  padrão;
- $\kappa$ - $\epsilon$  RNG;
- $\kappa$ - $\omega$  padrão;
- $\kappa$ - $\omega$  SST.

Ao longo dos anos diversos modelos para o cálculo da turbulência de duas equações foram propostos. Segundo Cebeci (2004), três dos mais populares, precisos e amplamente utilizados são os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  de Jones e Launder, o  $\kappa$ - $\omega$  (padrão) de Wilcox e o SST de Menter, que combina o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  para a região exterior do escoamento e o modelo  $\kappa$ - $\omega$  para a região próxima das paredes. Ambos os modelos são abrangentes em termos de aplicação e apresentam bons resultados.

Os resultados das simulações numéricas são bastante condicionados pelo tipo de modelos utilizados na sua resolução. Neste sentido a escolha correta do modelo de turbulência é essencial. Os modelos apresentados são apenas alguns dos modelos disponíveis, mas para o presente estudo esperam-se obter bons resultados, com uma boa convergência dos resíduos, utilizando apenas um ou uma combinação de modelos (Daud et al., 2011).

As informações que se seguem nas subsecções seguintes baseiam-se maioritariamente no manual Theory Guide (2011) do FLUENT e no livro de texto de Cebeci (2004).

### 2.2.2.1 $\kappa$ - $\epsilon$ padrão

O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$ , introduzido por Launder e Spalding, é o modelo de turbulência de duas equações mais amplamente utilizado (Mohammadi e Pironneau, 1994). Consiste em duas equações: uma equação para a energia cinética  $\kappa$  e outra para a taxa de dissipação de energia de turbulência  $\epsilon$ . É um modelo robusto e retorna soluções razoavelmente precisas para uma vasta gama de aplicações. Pode ser relacionada com submodelos de forma a resolver por exemplo a compressibilidade.

Tem como limitações principais um fraco desempenho em reproduzir corretamente para escoamentos que apresentem grandes gradientes de pressão, forte separação, componentes elevadas de vorticidade e uma curvatura elevada das linhas de corrente.

O modelo não funciona corretamente próximo de paredes, onde os termos viscosos não são zero, como no interior da CL. Uma solução é a utilização de leis de parede, sendo elas

definidas consoante se trate da subcamada viscosa, da camada intermediária ou da região da fórmula logarítmica para o perfil de velocidades.

O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  é de facto apropriado para escoamentos sem recirculação e estacionários, além de que as equações utilizadas por este modelo aplicam-se apenas a escoamentos ausentes de tensões de corte.

O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  sobrestima os níveis de turbulência em situações em que o escoamento é perpendicular a uma parede. Outro caso em que o modelo falha consiste nos escoamentos médios unidireccionais no interior de condutas de secção poligonal, onde o modelo não produz os escoamentos secundários que ocorrem junto aos seus cantos.

Visto que o propósito desta tese é analisar se existe separações no escoamento interior aos convergentes este não deverá ser o melhor método. No entanto, visto ser universalmente aplicado será estudado como forma de referência para os restantes modelos.

#### **2.2.2.2 $\kappa$ - $\epsilon$ RNG**

O modelo denominado *Renormalization Group Theory* (RNG), que consiste numa extensão do modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão, foi criado por Yakhot e Orsag. Neste modelo, os parâmetros  $\kappa$  e  $\epsilon$  são determinados da mesma forma que o modelo padrão, diferenciando-se unicamente na definição de oito parâmetros. Demonstra um melhor desempenho que o modelo padrão em escoamentos complexos que apresentem com tensões de cortes, elevadas taxas de deformação, vorticidade e separação.

Este modelo é mencionado pelos autores Daud, Li, Beg e AbdulGhani (2011) como sendo um dos modelos mais empregues em simulações de escoamentos no interior de condutas. Um motivo adicional para este ser incluído no presente estudo.

#### **2.2.2.3 $\kappa$ - $\omega$ padrão**

O modelo  $\kappa$ - $\omega$  é também muito popular e bastante utilizado. A forma empregue no FLUENT é baseada no modelo de Wilcox. São utilizadas formas diferentes de calcular a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) em relação aos métodos anteriores. Existem opções para resolver fenómenos como os efeitos de compressibilidade e escoamentos transitórios.

Verifica-se ser melhor do que o  $\kappa$ - $\epsilon$  quando o desenvolvimento da camada limite constitui um aspeto fundamental para o estudo – como o nosso caso. Possui uma formulação robusta para números baixos de Reynolds na subcamada viscosa, sem ser necessário recorrer a funções auxiliares. Nas paredes o modelo define que a energia cinética turbulenta  $\kappa$  é igual a zero.

#### **2.2.2.4 $\kappa$ - $\omega$ SST**

O modelo SST (shear stress transport) de Menter combina diversos elementos desejáveis de ambos os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  e  $\kappa$ - $\omega$ . A modelação por zona recorre ao modelo  $\kappa$ - $\omega$  de Wilcox para a região próxima das paredes sólidas e o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  de Launder e Sharma na zona próxima do limite da CL e para as regiões sem tensões de corte. A alternância entre os dois modelos é efetuada através da combinação de pesos nos coeficientes de cada função (Cebeci, 2004). O

modelo SST contém também uma função de viscosidade turbulenta dos turbilhões, melhorando a capacidade de previsão do método para a previsão da ocorrência da separação do escoamento.

Sendo o modelo SST considerado um «híbrido» dos modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  e  $\kappa$ - $\omega$ , permite obter o perfil de velocidade ao longo de uma secção inteira de uma conduta, para além de ser capaz de detetar qualquer recirculação ou turbilhões que ocorram junto à superfície do convergente. O modelo apresenta um bom desempenho para escoamentos complexos com uma CL sob gradiente adverso de pressão e separação (Leifsson e Koziel, 2015), fornecendo geralmente uma estimativa correta para a dimensão da separação.

Visto caracterizar com exatidão o escoamento em toda a secção de uma conduta, próximo e afastado da parede, facto essencial para as diversas métricas empregues no presente trabalho, o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST apresenta-se como a melhor escolha para o modelo de turbulência do presente trabalho, por forma a determinar fielmente o escoamento.

### 2.2.3 Funções de parede

Nas proximidades das paredes sólidas, a velocidade do escoamento passa de zero até a 99% da velocidade do escoamento médio, numa distância de  $\delta$ . As simulações numéricas têm de ser capazes de recriar fielmente o escoamento nessa região. Por forma a resolver computacionalmente as equações de governo do escoamento junto a uma parede, são possíveis dois métodos: resolver efetivamente o escoamento junto da parede e assim obter resultados mais precisos, o que incorpora maior esforço computacional; ou a ferramenta computacional calcula os efeitos do escoamento dentro da camada limite utilizando leis de parede, sem ser necessário resolver com exatidão o escoamento nessa região.

As funções de parede baseiam-se na teoria que descreve o perfil de velocidades na camada-limite. Existem três regiões distintas em escoamentos turbulentos próximo a paredes:

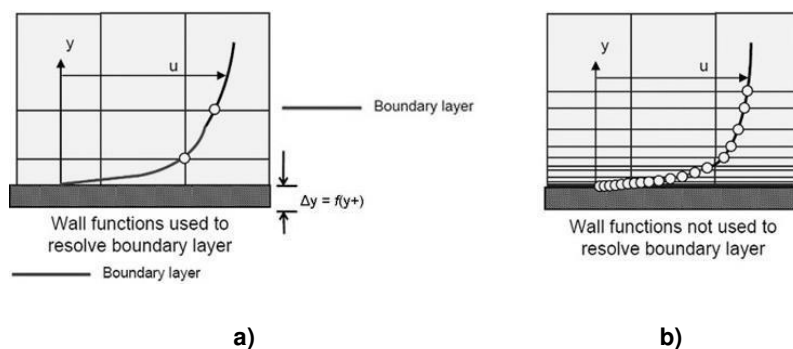
- Subcamada viscosa, onde a tensão viscosa é dominante;
- Camada externa, em que a tensão turbulenta é dominante;
- Camada intermediária ou de superposição, onde ambos os tipos de tensão são importantes;

Para cada uma destas regiões existe uma expressão matemática que traduz o perfil de velocidade que podemos encontrar no escoamento. A lei interna de parede (subcamada viscosa) segue uma relação viscosa linear desde a parede até ao valor em torno de  $y^+=5$ , a partir do qual se desvia de forma a se ajustar à lei logarítmica a partir de  $y^+=30$  (White, 2011) – o valor  $y^+$  é definido mais à frente nesta secção.

Estes valores de  $y^+$  que são basilares para a utilização das funções de parede de forma correta por parte do FLUENT. A sua utilização deve ser empregue apenas em situações em que o valor de  $y^+$  seja superior a 30 (Fluent, 2011). Para uma resolução exata do escoamento próximo das superfícies deve-se utilizar uma malha refinada em que o valor de  $y^+$  seja inferior a 5. Mostram-se representações das malhas de discretização dos dois casos na Figura 2.16.

Pode-se evitar bastante esforço computacional através da utilização de leis de parede, mas os resultados obtidos muitas vezes não possuem o detalhe necessário para análises de engenharia (tal como no caso deste estudo). Nesses casos, é necessário refinar a malha utilizada para discretizar o domínio junto da parede, por forma a determinar com precisão o gradiente correspondente à grande variação no perfil de velocidades na direção normal à parede. O modo mais fácil de obter malha estruturada e refinada ao longo das superfícies modelar é aplicando o comando de controlo de malha *Inflation layer meshing* disponível no FLUID FLOW, no menu *Mesh* (Fluent, 2011).

Se a malha da discretização for grosseira, como demonstrado na representação da Figura 2.16 a), utilizando para a resolução das *RANS* as funções de parede, é utilizado um número reduzido de células para estudar o escoamento.



**Figura 2.16 – Critérios de discretização do domínio próximo de uma parede, para uso de: funções de parede (a), resolução direta (b) [LEAP Australia Pty Ltd, 2012].**

O refinamento da malha próximo da parede, tal como a apresentada na Figura 2.16 b), permite captar com precisão os fenómenos ocorridos no escoamento onde o perfil de velocidades não varia linearmente e determinando as características do escoamento no interior da CL: vórtices, recirculações, ponto de separação do escoamento, etc. A escolha de providenciar uma malha refinada junto à superfície do modelo está fortemente relacionada com a escolha do modelo de turbulência, bem como o escoamento que estamos interessados em determinar (LEAP Australia Pty Ltd, 2012).

Demonstra-se desta forma a importância da distância do primeiro nó utilizado pela malha de discretização em relação à superfície. Utiliza-se esta distância do primeiro nó à parede para definir o valor  $y^+$ . O seu valor que determina se o método de resolução das equações na ferramenta computacional é através de uma função de parede ou da resolução exata das equações do escoamento.

Considerando a malha adjacente a uma parede,  $y^+$  é uma grandeza associada diretamente à distância entre o primeiro nó e a referida superfície – altura da primeira célula da malha junto à parede, a que por conveniência se chamará de  $h$  nos estudos de independência da malha. e da velocidade do escoamento em si nesse ponto. A expressão matemática que descreve a definição do valor de  $y^+$  é a seguinte (White, 2011):

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (2.8)$$

A grandeza  $u^*$  é denominada velocidade de atrito, devido às suas dimensões de velocidade, embora não retrate de facto uma velocidade de escoamento.

Outra questão essencial ao presente trabalho é que se pretende detetar com exatidão os pontos em que ocorram separações do escoamento. Assim pretende-se criar uma malha muito refinada junto às paredes dos constituintes do túnel aerodinâmico, principalmente em zonas em que é mais provável o desprendimento de vórtices. A dimensão das células junto às superfícies – mais concretamente a sua espessura relativamente ao eixo radial – deve ser pequena de modo a se estudar minuciosamente os fenómenos que ocorrem no interior da CL. Dessa forma deve-se cumprir o critério de  $y^+ < 1$  para a malha empregue nas simulações numéricas, de forma a assegurar a que esta recrie de forma exata as condições do escoamento na camada limite.

Para fins de aplicação de funções de parede por parte dos modelos de turbulência, o valor de  $y^+ = 11,25$  é o que distingue a aplicação da lei logarítmica (afastada da parede) e da lei de viscosidade de Newton (próximo da parede) para fins de simulação do escoamento.

A experiência demonstra que para  $20 \leq y^+ \leq 100$ , decorre a chamada camada logarítmica, enquanto que próximo da parede ( $0 \leq y^+ \leq 20$ ), onde o perfil de velocidades é praticamente linear, é a apelidada subcamada viscosa (Fluent, 2011; Mohammadi e Pironneau, 1994)

As funções de parede estão disponíveis para os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  (padrão, RNG ou Realizable), visto que esses modelos não resolvem as equações do escoamento *RANS* em regiões onde se verifiquem elevados níveis de tensão de corte, como na CL. O modelo  $\kappa$ - $\omega$  resolve as equações que governam o escoamento junto às paredes, pelo que determina com precisão o escoamento nessa região, motivo pelo qual não as utiliza.

Deste modo, as leis de parede estabelecem-se de forma a auxiliar as equações Navier-Stokes. Infelizmente, quando a ocorre separação nas CL, a análise segundo a teoria de Prandtl não é mais possível e a região de gradientes elevados deixa de ser “fina”. Nessas condições as leis de parede falham.

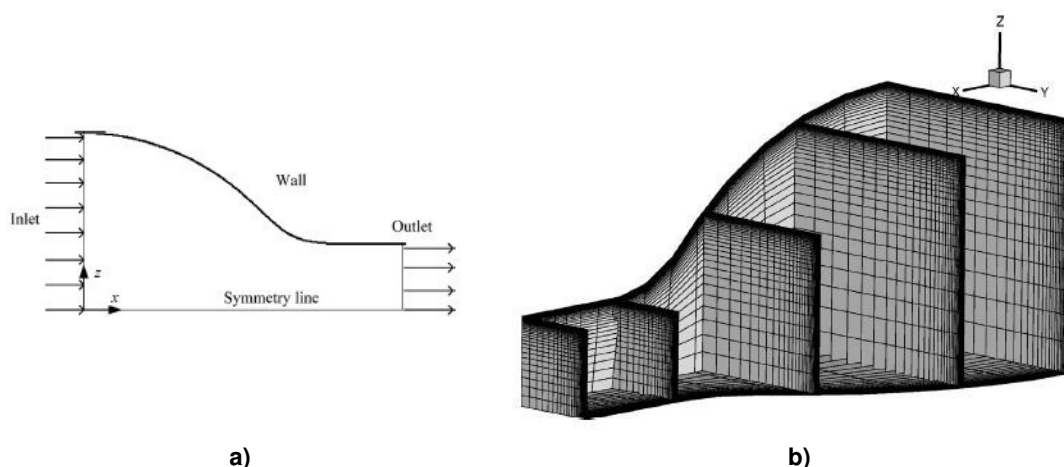
## 2.2.4 Discretização do domínio

A melhor forma de discretizar o domínio computacional depende do domínio que se pretende criar e analisar (2D ou 3D). No presente trabalho, com o propósito de se estudar o ábaco de Levin nas suas condições de aplicabilidade, para o estudo foi criado um domínio computacional bidimensional.

Independentemente do tipo de espaço usado para se proceder ao estudo computacional, as condições fronteira a aplicar deverão ser: «*velocity-inlet*», de definição de uma velocidade na secção de entrada; de parede (*wall*) nas superfícies sólidas, em que define a superfície como sendo impermeável ao escoamento; de simetria (no eixo para o caso 2D, no plano para o caso 3D); e por fim, «*outflow*» na secção saída, definindo que o caudal nessa secção deve apenas sair do volume de controlo em estudo. Na secção de saída é preferível esta condição do que a de «*pressure-outlet*» por forma a não se constanger em demasia o escoamento a ser determinado, pois caso se utiliza-se este último obrigaria a que todas as linhas de corrente na secção

de saída do convergente fossem forçosamente perpendiculares à secção de saída (i.e., alinhadas com o eixo de simetria do convergente), o que não tem de ser necessariamente verdade. Embora seja esse o efeito esperado (a secção de saída encontra-se à pressão atmosférica) pretende-se no entanto deixar liberdade ao modelo para determinar a inclinação mais correta das linhas de corrente.

O domínio computacional utilizado para estudar o convergente terá de ser mais comprido do que a Figura 2.17 a) sugere, a montante e a jusante, para não se constranger em demasia as condições do escoamento no interior do convergente, por forma o escoamento ser corretamente calculado.



**Figura 2.17 – Representação das condições fronteira a aplicar (a) e o aspeto do refinamento da malha junto às paredes do convergente (b) [Leifsson e Koziel, 2015]**

Quanto ao efeito de a malha ser muito mais refinada na proximidade das paredes do convergente – tal como retratado na Figura 2.13 b) – por forma ao escoamento ser corretamente calculado e descrito pelas equações de governo do escoamento.

#### **2.2.4.1 Critérios de qualidade de malha**

São necessárias malhas de elevada qualidade para a discretização do domínio, de modo a que as simulações *CFD* capturem da forma mais precisa possível os efeitos físicos não lineares do escoamento (Leifsson e Koziel, 2015). Assim, as malhas criadas deverão ser suficientemente refinadas de modo a capturar esses efeitos.

A qualidade da malha de discretização depende muito de uma série de parâmetros, tais como o ângulo de distorção e a razão de aspeto dos vários elementos da malha, assim como da qualidade dos elementos gerados. Para uma célula ser considerada aceitável a dimensão dos seus lados não deve ultrapassar a proporção de 1 para 5, sendo aconselhável que esta seja inferior a 3 (Roque e Mendes, 2012). A taxa de crescimento mencionada refere-se ao crescimento verificado entre células adjacentes.

De seguida descrevem-se os diversos critérios que permitem considerar que uma malha de discretização de domínio computacional seja de boa qualidade, sendo os disponíveis pela ferramenta FLUID FLOW (Fluent, 2011):



Na geração das diversas malhas empregues no estudo deve-se ter sempre a preocupação de respeitar para a totalidade dos elementos os limites apresentados na Tabela 2.1 para os diferentes critérios (Fluent, 2011):

**Tabela 2.1 – Critérios de qualidade da malha e respetivos limites para uma malha aceitável (Fluent, 2011).**

Critério de qualidade da malha	Limites a verificar
<i>Aspect Ratio</i>	< 5
<i>Skewness</i>	< 0,95
<i>Orthogonal Quality</i>	> 0,10
<i>Element Quality</i>	-

O critério *Aspect Ratio* mede o nível de alongamento das células. Habitualmente o seu valor deve ser inferior a 5:1.

O critério *Skewness* mede a diferença entre o formato da célula e o formato da sua equivalente em volume com todos os lados do mesmo comprimento. As células deformadas fornecem menor precisão, podendo prejudicar a convergência da solução. Os valores aceitáveis deste fator são inferiores a 0,95 e inferiores em média a 0,30.

Os valores dos fatores *Orthogonal Quality* e *Element Quality* traduzem os propósitos dos critérios *Skewness* e *Aspect Ratio* (respetivamente), calculando-os de forma diferente.

Além destes, o *Growth Ratio* mede relação de crescimento entre células sucessivas. Apesar de importante, não foi tabelado porque não foi possível fazer a sua avaliação por não ser apresentado conjuntamente com as estatísticas dos restantes critérios no FLUID FLOW. O seu valor de crescimento não deve ultrapassar os 2,0 (crescimento de 200% entre células adjacentes), e de preferência não ser superior a 1,2.



# 3

## MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se, primeiramente, a formulação *CFD* do problema empregue para a realização do estudo computacional do presente trabalho, onde se inclui o domínio computacional, os tipos de discretização do mesmo e condições fronteira e os respetivos modelos numéricos aplicados para a obtenção dos resultados computacionais. Por fim, são descritos os indicadores de escoamento empregues na análise e interpretação dos resultados.

### 3.1 Formulação *CFD* do problema

Na realização da simulação *CFD* foi empregue a ferramenta comercial ANSYS FLUENT 16.2®, recorrendo ao método dos volumes finitos para discretizar as equações de governo do escoamento. O estudo do escoamento através da ferramenta implica quatro fases: a geração do domínio computacional, a criação da malha de discretização, a resolução numérica das equações *RANS* e o tratamento dos resultados da ferramenta (*post-processing*).

O ANSYS *Workbench* possui um gerador de geometrias, o FLUID FLOW - *DesignModeler*. No entanto, para esse efeito recorreu-se à ferramenta CAD, o SOLIDWORKS 2013®, alcançando-se o mesmo propósito de forma mais expedita e permitindo gerar de forma exata os contornos dos convergentes definidos por polinómios de 3.º grau. Dessa forma, gerou-se na ferramenta de CAD o domínio computacional (a geometria do convergente), sendo posteriormente importado no gerador de malha da ANSYS, o FLUID FLOW®, para se proceder à discretização do domínio.

#### 3.1.1 Domínio computacional

O âmbito deste trabalho consiste em avaliar apenas um único componente que compõe o túnel aerodinâmico, o convergente. Significa que, não é simulado o escoamento no interior de qualquer dos restantes constituintes. Como tal, este trabalho consiste numa primeira abordagem para o projeto do túnel aerodinâmico, o estudo inicial do convergente. Geralmente, o domínio

computacional é diferente do domínio físico, sendo por vezes necessário estender o domínio computacional a montante e a jusante.

Neste trabalho, pretende-se criar domínios computacionais correspondentes a convergentes de secção circular, com o propósito de estudar o ábaco do estreitamento hidráulico nas suas condições de aplicação. Isto significa que o propósito não é simular a saída do convergente retangular a ser empregue no túnel aerodinâmico. Portanto, os domínios a gerar na ferramenta de CAD são bidimensionais, sendo empregue uma resolução no FLUENT® num espaço 2D axissimétrico por forma a estudar uma conduta de secção circular (domínio de revolução). A revolução do domínio é realizada em torno do eixo longitudinal do convergente, coincidente com o eixo x do domínio computacional criado (entidade apelidada de F, da Figura 3.1).

Apesar do propósito do estudo computacional ser, primeiramente, estudar o ábaco, de forma a aproveitar ao máximo as simulações realizadas, as ilações obtidas são também consideradas para o convergente tridimensional a ser projetado para o túnel aerodinâmico. Assim, todo o estudo levado a cabo neste trabalho tem por base simulações numéricas em condutas de secção circular.

A extensão do domínio gerado ultrapassa as dimensões do convergente em termos longitudinais (ver Figura 3.1), por forma às condições fronteira aplicadas na entrada e saída do domínio não constrangerem numericamente o escoamento no interior do próprio convergente (Vaz et al., 2016).

Assim, a secção de entrada do domínio computacional (*Inlet*) precede a secção de entrada do convergente (coincidente com o eixo y) em 2 diâmetros de entrada, enquanto a secção de saída do domínio (*Outlet*) sucede a secção de saída do convergente (*Nozzleout*) em 5 diâmetros de saída – diâmetros da conduta a estudar, sendo no domínio computacional gerado representado apenas o seu raio.

O domínio computacional bidimensional gerado representa uma conduta com uma redução de secção suave. A diferença entre os diversos convergentes simulados são os coeficientes das duas equações polinomiais de terceiro grau – calculados segundo as indicações de Levin (1968) no ábaco – que definem o contorno de cada um dos convergentes de secção circular, axissimétricos. Desta forma, cada geometria testada possui curvatura e dimensões distintas.

### 3.1.2 Tipos de discretização do domínio

As malhas criadas deverão ser suficientemente refinadas de modo a capturar os efeitos físicos não lineares do escoamento.

Para gerar os diferentes domínios computacionais, com o objetivo de estudar os diferentes formatos de convergentes e divergentes, foram empregues na malha elementos de diferentes tipos. Junto à camada limite (CL), onde o efeito viscoso junto das paredes é elevado, foi empregue uma malha estruturada com a finalidade de captar fielmente o escoamento nessa região (malha do género Quad). No restante domínio, associado ao escoamento médio, foi utilizada uma malha combinando elementos quadriláteros e triangulares (malha do tipo Quad-Tri) de forma a se adaptar à geometria do convergente.

**Tabela 3.1 – Métodos automáticos de geração de malha possíveis no FLUID FLOW e respetivo tipo de elementos gerados**

Método Automático	Surface mesh method	Free face mesh type	Tipo de malha gerada
<i>Quadrilateral Dominant</i>		Quad/Tri	Quad-Tri
		All Quad	Quad <sup>3</sup>
<i>Multizone Quad/Tri<sup>4</sup></i>	Program Controlled	All Tri	Tri
		Quad/Tri	Quad-Tri
		All Quad	Pave
	Uniform	All Tri	Tri
		Quad/Tri	Quad-Tri
		All Quad	Pave
	Pave	All Tri	Tri
		Quad/Tri	Pave
		All Quad	Pave
<i>Triangles</i>			Tri
<i>Face Meshing<sup>5</sup></i>			Map

De modo a controlar o crescimento do tamanho das células alinhadas com as linhas das entidades A,B,C, e E (Figura 3.1), foi utilizada a funcionalidade *Bias*. Assim, foi possível fazer crescer os elementos da malha, poupando no número de elementos utilizados nas regiões que não se pretendiam estudar. O valor de *Bias* aplicado nestas situações foi de 1,5 – o que significa que elementos sucessivos possuem um fator de crescimento de 50% entre os elementos adjacentes, alinhados sobre as linhas limítrofes referidas. Quanto ao valor de *Growth Rate* utilizado foi de 1,2 para as malhas geradas.

3 A aplicação do método automático de geração de malha em questão produz elementos do tipo Tri além de elementos do tipo Quad.

<sup>4</sup> O método automático de geração de malha discretiza as faces com forma retangular através de malha do tipo Map, por defeito.

<sup>5</sup> Apesar de não se tratar de facto um *Automatic Method* como os restantes, trata-se de uma opção distinta do menu *Mesh* do FLUID FLOW.

Na geração das diversas malhas empregues no estudo teve-se sempre a preocupação de respeitar, para a totalidade dos elementos, os limites dos critérios de qualidade da malha descritos na secção 2.2.4.1.

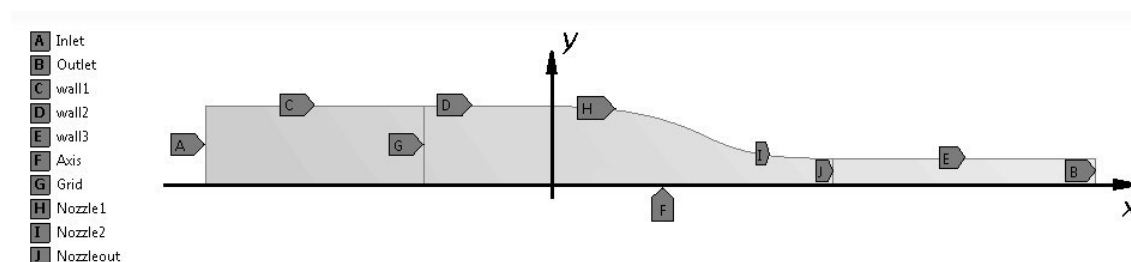
Existem vários métodos automáticos para se proceder à geração de malha no programa FLUID FLOW. É averiguado na secção 4.1.1.1 qual deles melhor se aplica aos casos a estudar. Uma lista dos diversos métodos é apresentada na Tabela 3.1, onde se apresenta o tipo de elementos presentes na malha gerada através de cada uma das opções disponibilizadas pelos métodos.

Apesar de aconselhável, não foi possível aplicar o critério  $y^+ < 1$  a todo o comprimento da superfície do convergente, devido ao facto de a licença ANSYS usada se encontrar restringida a 512 000 elementos. Desse modo optou-se por garantir que o valor  $y^+$  verifica o critério para todos os elementos na periferia do domínio computacional desde a sua secção de entrada até à secção onde se situa o ponto de inflexão (PI) do contorno.

### 3.1.3 Condições fronteira

A resolução das equações *RANS*, que governam o escoamento, obedece às imposições estabelecidas pelas condições fronteira definidas para o domínio computacional. O domínio computacional constituído por três faces, assim como as superfícies fronteira (linhas) que as delimitam, são apresentados para um caso genérico, representado na Figura 3.1.

As condições fronteira aplicadas às diversas superfícies fronteira são apresentadas na Tabela 3.2. Às duas entidades (linhas G e J) que delimitam as três faces do domínio não foi imposta qualquer condição, funcionando estas unicamente como auxílio ao controlo da malha gerada. A localização definida para a *Grid* destina-se à implementação de uma *UDF* (capítulo 4.5), do género da representada na 4.38, que introduza o efeito de perda de carga, associado à presença de um elemento de redução de turbulência. O escoamento foi definido segundo o sentido positivo do eixo *x*.



**Figura 3.1 – Domínio computacional 2D repartido em 3 faces, eixos coordenados, e localização das superfícies fronteira (caso exemplo:  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,60$ )**

O valor definido para a velocidade do escoamento na secção de entrada está relacionado com a velocidade máxima que pode alcançar na secção de teste do túnel aerodinâmico, visto ser esse o regime de funcionamento em que a sua intensidade turbulenta será maior. Pretende considerar uma velocidade que seja exequível em termos do regime de funcionamento apresentado pelo túnel, atendendo às perdas de carga existentes no mesmo. Tendo em consideração

as dimensões de saída definidas no anteprojeto do convergente, definiu-se que a secção de saída do convergente possui um diâmetro de 400 mm. Considerando um convergente que apresenta um rácio de áreas de 9:1, o diâmetro da secção de entrada é de 1200 mm.

**Tabela 3.2 – Condições fronteira aplicadas nas superfícies fronteira criadas**

Superfície fronteira	Ref.	Condição fronteira aplicadas
Inlet	A	Velocity-inlet (2,05 m/s)
Outlet	B	Out-flow
Wall1	C	Wall
Wall2	D	Wall
Wall3	E	Wall
Axis	F	Axis (axissymmetric)
Grid	G	-
Nozzle1	H	Wall
Nozzle2	I	Wall
Nozzleout	J	-

Considerando uma velocidade de 20 m/s à saída do ventilador, pela conservação de massa equivale a uma velocidade de 2,22 m/s na câmara de tranquilização, esta velocidade irá variar consoante as condições de funcionamento do túnel (consoante a perda de carga associada às redes a implementar na câmara de tranquilização, por exemplo). Tendo em consideração esta perda de carga ainda não quantificada (sendo necessários os estudos relativos aos elementos de redução de turbulência), foi definida uma velocidade de 2,05 m/s para a condição fronteira *Inlet*. A Intensidade turbulenta definida na secção de entrada foi de 5%, pelo método de Intensidade e Diâmetro Hidráulico.

Este valor de velocidade foi definido para todos os casos estudados – convergentes com rácios de 9:1 e 4:1, inclusive. Esta decisão visa permitir a comparação de convergentes axissimétricos, com rácios distintos de áreas, com base no ábaco de Levin para condutas circulares. Desta forma ambos os dois tipos de convergentes possuem igual diâmetro de entrada e igual caudal mássico, diferindo no diâmetro de saída.

A origem do referencial de pressões, para efeitos de apresentação de resultados, foi definida sobre a intersecção da secção de saída do convergente (entidade J) e o eixo axial do domínio  $x$  (centro da secção de saída do escoamento). A justificação é de que a secção de saída do convergente coincide com o fim da estrutura do túnel de circuito aberto, encontrando-se à pressão atmosférica.

O plano 2D referente ao domínio computacional gerado representa um plano de escoamento meridional. Embora no estudo de condutas circulares assim o seja – domínio de aplicabilidade do ábaco do estreitamento hidráulico – isso não é de facto verdade para uma conduta de secção retangular como a pretendida para o convergente do túnel aerodinâmico, motivo este é

indispensável a realização futura de uma análise tridimensional ao escoamento no interior do túnel, de forma a garantir a exatidão dos resultados obtidos e para ser possível estudar o comportamento de escoamentos secundários. Espera-se, no entanto, que os resultados do presente estudo constituam uma boa aproximação ao caso real.

## 3.2 Modelos numéricos

Os modelos numéricos empregues pela ferramenta ANSYS FLUENT® consistem nas equações de conservação de massa, da quantidade de movimento: as *RANS* (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) estacionárias.

O escoamento é definido como estacionário e axissimétrico. O fluido de trabalho, o ar, é assumido com uma temperatura de 15 °C, um valor de massa volúmica constante de 1,225 kg/m<sup>3</sup>, com um valor de viscosidade dinâmica definido de 1,7894×10<sup>-5</sup> kg/(m.s). Para as velocidades de escoamento verificadas no interior do túnel aerodinâmico, o ar comporta-se como um fluido incompressível ( $Ma < 0,3$ ).

### 3.2.1 Modelos de turbulência

Neste trabalho serão estudados e comparados os resultados para o mesmo escoamento, obtidos através de simulações numéricas que empregam diferentes modelos de turbulência. A intenção é comprovar, tendo em consideração as indicações da literatura, qual o modelo que melhor caracteriza o escoamento que ocorre no interior de um convergente que promove recirculação à sua entrada. Desse modo, ao comparar empiricamente os diferentes modelos de turbulência que podem determinar corretamente a bolha de recirculação existente no escoamento, seleccionar-se-á o modelo a empregar nos estudos levados a cabo neste trabalho, para os diferentes convergentes. Os modelos de turbulência testados (capítulo 4.1.2) são os mencionados na secção 2.2.2:  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\omega$  padrão e  $\kappa$ - $\omega$  SST.

Para obter uma inicialização melhor para os modelos de turbulência a aplicar, por forma a garantir uma melhor convergência, a simulação numérica deve ser iniciada pelo modelo Laminar, sendo definida como condição inicial uma velocidade na secção de entrada do modelo computacional. O modelo de turbulência a utilizar para o estudo principal deste trabalho foi definido de acordo com os resultados da secção 4.1.2.

A convergência iterativa de cada simulação é avaliada pela monitorização dos resíduos de todas as equações de governo do escoamento resolvidas em cada célula. Definiu-se como critério de convergência a convergência de todos os resíduos monitorizados, esperando-se que estes atinjam um *plateau*, para todas as soluções obtidas neste trabalho. O nível dos resíduos para os diversos casos é apresentado na Tabela 4.3, da secção 4.1.3.



### 3.2.2 Funções de parede

Visto que os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  não determinam de forma correta o escoamento em zonas com elevadas tensões de corte, como a CL junto das paredes do convergente, foram usadas funções de parede. Nos modelos de  $\kappa$ - $\omega$  não foi necessário empregar qualquer função de parede.

Para todos os modelos de turbulência foi utilizada uma malha de discretização do domínio mais densa junto da superfície da parede do contorno, de forma a capturar os efeitos que surgem no interior da CL. Esta malha densa junto da parede foi obtida através do comando *Inflation*, gerando uma malha estruturada com a espessura de 15 células.

A malha estruturada criada através da *Inflation* possui um *Growth Rate* de 1,15, sendo a distância entre o primeiro nó sobre a parede sólida do contorno definido pelo valor de  $h$ . O valor de  $h$  empregue nas simulações foi determinado no estudo de independência da malha. Pretendeu-se obter um valor  $y^+$  inferior a 1, pelo menos desde a secção de entrada do domínio computacional até ao PI do contorno, em todos os casos de convergentes diferentes estudados. No entanto, não foi possível garantir esta condição em toda a extensão da superfície exterior do domínio devido ao número limitado de elementos permitido pela licença de utilização do FLUENT®.

### 3.2.3 Esquemas numéricos

A resolução usada foi *Pressure-based*, em que o campo de velocidades é obtido das equações da quantidade de movimento. Adotou-se um esquema de acoplamento de pressão e velocidade o algoritmo SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations). Para a discretização espacial, utilizaram-se para a pressão e para o momento, algoritmos de segunda ordem, enquanto que para a energia cinética turbulenta usou-se algoritmos de primeira ordem.

Para os controlos de solução (*Solution Controls*) definem-se diferentes valores para os fatores de relaxação, iniciando a resolução com valores mais baixos, aumentando-os durante a resolução das iterações de forma a aumentar a rapidez da convergência. Os valores a utilizar visam garantir o compromisso entre a estabilidade dos cálculos numéricos e a velocidade de convergência, através da alteração do valor das variáveis de transporte de uma iteração para a seguinte. Durante o processo iterativo os resíduos são calculados para cada uma das equações do sistema de transporte. Os resíduos são monitorizados até que seja verificada a convergência da solução numérica.

### 3.2.4 Modelo, implementado por UDF, de uma rede com perda de carga

A criação da *UDF* (User Define Function) tem por objetivo recriar o efeito de perda de pressão no fluido aquando da passagem deste por elementos de redução de turbulência. A rede será assim simulada através de uma perda de carga localizada, concentrada num plano, sem espessura, transversal ao escoamento. Não é objetivo deste trabalho definir fisicamente ou dimensionar os «favos de abelha» ou redes – definir a porosidade, o diâmetro do fio a usar, etc. Pretende-se, sim, criar um método que possa ser utilizado em trabalhos futuros que permita o estudo da geometria do difusor, como do restante túnel aerodinâmico, e quantificar a perda de

carga necessária. Dessa forma, o âmbito deste trabalho é implementar no modelo do FLUENT o efeito de perda de carga associado à presença da rede de redução de turbulência no interior do túnel aerodinâmico, na câmara de tranquilização. Em trabalhos futuros, para os quais este presente trabalho contribui, é necessário proceder à simulação do túnel completo, incluindo-se assim os referidos elementos de redução de turbulência do escoamento.

Apesar de delegado para trabalho futuro a seleção dos elementos a serem empregues para reduzir a turbulência no escoamento, o elemento mais provável de ser instalado na câmara de tranquilização será a rede de alisamento de escoamento, com o objetivo de economizar no comprimento deste constituinte do túnel aerodinâmico. Em trabalhos futuros tem-se por objetivo definir a porosidade da rede ou dos «favos de abelha», e conseqüentemente a perda de carga introduzida por esta no escoamento, de modo que as linhas de corrente aderiram o máximo possível às paredes do divergente, a montante da câmara de tranquilização onde se encontra instalada a rede de alisamento de escoamento, prevenindo a ocorrência antecipada de separação no escoamento, diminuindo a bolha de recirculação, e simultaneamente sem introduzir perda de carga em demasia.

Para o estudo detalhado acerca da opacidade da rede (i.e., do diâmetro dos fios da rede assim como a proporção para a área de passagem entre os filamentos, como referido no capítulo 2.1.3.7) e o respetivo efeito de diminuição da turbulência no escoamento, terá de ser utilizada uma abordagem mais direta para o seu estudo. Para obter resultados precisos será necessário: simular numericamente com fidelidade a rede (o que exigirá um grande esforço computacional), ou aplicar a Lei de Darcy para meios porosos, de modo a retirar conclusões mais precisas quanto ao seu dimensionamento.

Nos casos de estudo presentes neste subcapítulo, o objetivo é bem mais simples, como abordagem inicial à modelação das redes de alisamento pretende-se apenas adquirir *know how*, implementar e controlar uma perda de carga a localizada numa secção transversal de uma conduta simples, associada à presença de uma rede de alisamento do escoamento no interior de uma conduta. É possível aplicar uma queda de pressão no FLUENT a partir da ferramenta “*Porous Jump*” através das “*Boundary Conditions*” ao definir valores de coeficientes de porosidade. No entanto preferiu-se recorrer à potencialidade do programa que permite criar funções programadas pelo próprio utilizador, personalizando o código utilizado pelo software na resolução das iterações: *User-Defined Function (UDF)*. Desta forma, a função a utilizar é criada por nós, permitindo um maior conhecimento e controlo sobre a ferramenta, e atuando diretamente na variação de pressão. Deste modo será possível quantificar através dos estudos futuros a perda de carga necessária que a rede deve apresentar e só depois dimensionar convenientemente a (opacidade da) rede.

A variação de pressão verificada não procura ter significado. O seu intuito é apenas demonstrar a forma como a distribuição de pressão ocorre ao longo de um escoamento no interior uma conduta, que possui um meio poroso a meio do seu comprimento axial. Tratam-se apenas de exemplos da aplicação das *UDF* desenvolvidas, onde se procura verificar o efeito que a rede desempenha sobre o escoamento, nomeadamente, os efeitos da pressão.

A criação das *UDF* descritas foram resultado de um processo construtivo de aprendizagem e experimentação, de forma a alcançar o efeito pretendido. Assim, a intensão não foi obter resultados precisos de pressão, mas sim, a construção do método a ser empregue em trabalhos

futuros. Na página 125 do capítulo Apêndices, é apresentado o código das duas alternativas exploradas, aplicando Macros independentes diferentes, de forma a implementar perda de pressão numa secção de uma conduta, sendo obtidos resultados bastante distintos.

As *UDF* são escritas em linguagem de programação C (ANSYS Fluent UDF Manual, 2013) recorrendo às funções e Macros DEFINE fornecidas pelo FLUENT. O ficheiro onde é programado o código (extensão do tipo \*.c) deve ser inicialmente interpretado ou compilado. A *UDF* modeladas independentemente são implementadas no *solver* do através das “*Function Hooks Adjust*”, que permite manipular as variáveis a implementar no *solver*. Assim as *UDF* implementadas serão executadas durante a simulação, no início de cada iteração, juntamente com as restantes equações de governo do escoamento para escoamentos estacionários, como é o caso do nosso estudo. Permite aplicar valores de pressão e de velocidade, entre outros, nas células ou faces do domínio.

Relativamente à escrita das *UDF*, as hipóteses exploradas recorrem a duas Macros DEFINE distintas. A primeira hipótese, a Macro geral DEFINE\_ADJUST (name, d), tem como únicos argumentos o nome da própria *UDF* e o *pointer* do domínio sobre o qual a função deve ser aplicada. É utilizada para ajustar ou modificar variáveis do FLUENT que não são fornecidas como argumentos. O resultado da aplicação deste primeiro caso encontra-se apresentado na Figura 4.38, apresentando-se o código respetivo na Figura 7.24 dos Apêndices. A perda de carga localizada foi aplicada a meio comprimento de uma conduta, em que o domínio computacional se encontra dividido em duas faces, sendo elas separadas por uma linha vertical. A *UDF* foi concebida para ser aplicada a essa linha, sendo esta afeta ao endereço ID característico da mesma (no caso da malha gerada, está associada ao ID 14).

A segunda hipótese na escrita da *UDF*, a Macro específica DEFINE\_SOURCE (name, c, t, dS, eqn), permite especificar termos de origem personalizados para diferentes de equações de transporte resolvidas no FLUENT. O resultado da sua simulação encontra-se apresentado na Figura 4.39. Possui cinco argumentos: o seu nome, o índice c identifica a célula em que o termo de origem (*source term*) é aplicado, a variável fornecida “t” é um *pointer* para a thread do tipo célula, enquanto que dS especifica a derivada do termo de origem relativamente à variável dependente da equação de transporte, eqn. A derivada pode ser utilizada para linearizar o termo de origem de modo a reforçar a estabilidade do *solver*.

De modo a proceder à sua implementação desta *UDF* é necessário aquando da geração do domínio – no SOLIDWORKS ou no DesignModeler do ANSYS Workbench – criar-se uma face em separado (casos 2D) para o meio poroso, com as dimensões e a localização do mesmo, independente das faces restantes associadas à conduta a montante e a jusante do mesmo. No FLUID FLOW ao serem geradas superfícies em separado, as linhas que limitam as faces adjacentes são formadas na realidade por duas linhas sobrepostas: cada uma pertencente a cada uma das faces adjacentes. É necessário nomeá-las independentemente, i.e., atribuir designações diferentes a linhas limítrofes de faces do domínio sobrepostas, pertencentes a faces diferentes. Isto permite que no FLUENT, apesar da divisão do domínio computacional destinada à atribuição do meio poroso, será possível considerar as linhas que separam as faces, sobrepostas, como uma única interface pertencente a um meio contínuo único. Essa associação é realizada através do comando *Mesh Interfaces do Setup*.

Na geração do domínio criam-se 3 zonas distintas, sendo todas elas apresentadas no comando “*Cell Zone Conditions*”, uma delas relativa à face destinada a ser implementado o meio poroso. De modo a atribuir o comportamento do meio poroso à face destinada a esse efeito, segundo o código descrito na Figura 7.25 dos Apêndices, deve-se editar a zona em questão e selecionar a opção de “*Source Terms*”. No separador homólogo, em *X Momentum* deverá selecionar-se o nome da *UDF* programada, levando a que a zona do domínio separada inicialmente das restantes comportar-se-á como um meio poroso conforme o escoamento a atravessa.

### 3.3 Critérios para a separação do escoamento

Um dos objetivos deste trabalho é observar a existência de recirculação no escoamento para os casos no interior da zona interdita e sobre a linha limítrofe. Para identificar a existência de separação nos convergentes estudados recorre-se às diferentes métricas:

- Visualização da existência de bolha de separação pela observação da combinação dos contornos (*contours*) da velocidade axial  $V_x$  e dos vetores de velocidade no sentido contrário ao escoamento, e linhas de corrente, pelo «*Post-processing*» do FLUENT;
- Obtenção dos perfis de velocidade verificados em secções distintas dos convergentes, permitindo, por sua vez, a determinação dos valores da espessura da CL ( $\delta$ ), da espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ), da espessura de momento ( $\theta$ ) e do fator de forma do perfil de velocidade ( $H$ ). Para se determinar o valor de  $\delta$  nas secções analisa-se a concavidade e do ângulo formado entre os segmentos de reta que formam o perfil de velocidades, segmentos esses constituídos pelos valores da velocidade nos nós ao longo do raio da secção em estudo. De modo a avaliar o fim da CL recorre-se a médias corridas de 5 pontos para a análise dos valores de velocidade nos diversos nós das secções em estudo. Por fim, usa-se a regra dos trapézios com a finalidade de determinar os valores de  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$  a partir do valor de  $\delta$ . Deste modo, é possível obter diversos métodos que permitam interpretar os resultados, sempre com a finalidade de corrigir o possível desvio nos dados e melhorar a obtenção de resultados;
- Valores do coeficiente de fricção ao longo da parede do convergente ( $C_f$ ), do coeficiente de pressão estática ao longo da parede sólida do convergente ( $C_{pe}$ ) – assim como a sua taxa de variação  $\left. \frac{dC_{pe}}{dx} \right|_w$  – e ao longo do eixo de simetria do domínio computacional ( $C_{pe}(\mathbb{L})$ );
- Análise da perda de carga, assim como a razão da intensidade turbulenta verificada entre a secção de entrada e a saída verificada nos diversos convergentes.

Deste modo, o escoamento de cada convergente é analisado através de diversos métodos, sempre com a finalidade de melhorar a fiabilidade dos resultados a obter, minorar desvios nos resultados numéricos e obter conclusões acerca dos diferentes convergentes.

Neste subcapítulo apresenta-se a descrição dos métodos utilizados na obtenção e cálculo dos parâmetros de espessura da CL ( $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ ), dos coeficientes de pressão e de atrito ( $C_{pe}$ ,  $C_{pe(\Phi)}$ ,  $\frac{dC_{pe}}{dx}\big|_w$  e  $C_f$ ) e do estudo da razão da intensidade turbulenta.

### 3.3.1 Espessuras de camada limite

Apresentam-se, de seguida, os métodos de cálculo para o estudo dos parâmetros de espessura da CL. Este é um dos métodos de análise e comparação entre os diversos convergentes estudados neste trabalho e que consiste na análise dos fenómenos que ocorrem no interior da camada limite através do cálculo dos parâmetros que a caracterizam.

As equações apresentadas no capítulo 2.1.5.1 dizem respeito à teoria da placa plana onde é útil a utilização de coordenadas cartesianas para o referencial espacial. No entanto, o domínio computacional do presente trabalho consiste num domínio axissimétrico, pelo que em bom rigor as grandezas  $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$  não são caracterizadas pelas expressões apresentadas para a placa plana, mas considerando antes uma coroa tubular como domínio. A sua determinação envolve a transformação do jacobiano das expressões de um espaço de coordenadas cartesianas para um de coordenadas polares. No entanto, por se considerar que a espessura da CL é pequena comparativamente com o raio da conduta, não se julga prejudicial considerar as expressões da placa plana no presente estudo. Os desvios dos valores calculados através deste método são pouco relevantes, especialmente atendendo ao facto de que as conclusões são baseadas na comparação dos seus valores entre os diferentes contornos.

#### 3.3.1.1 Secções de leitura do perfil de velocidades

Procede-se à análise dos parâmetros da CL, decorrentes da teoria da placa plana, de modo a serem utilizados como métricas para avaliar a qualidade do escoamento resultante dos diversos convergentes. A comparação dos convergentes através dos parâmetros referidos no capítulo 2.1.5.1 ( $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ ) é realizada através do estudo dos perfis de velocidades em dez secções transversais dos domínios computacionais de cada contorno. A comparação dos perfis de velocidade entre convergentes distintos é efetuada em secções consideradas equivalentes. As secções transversais do convergente – representadas para um convergente na Figura 3.2 – são perpendiculares à superfície do convergente.



**Figura 3.2 – Secções do convergente onde são realizadas leituras dos perfis de velocidades: representadas no convergente  $D_0/D=3$  e  $c/L=0,20$**

Os valores das coordenadas axiais em que as secções transversais intersectam o contorno do convergente, adimensionalizadas pelo comprimento do convergente, são apresentadas na

Tabela 3.3. Com a dimensão longitudinal do domínio adimensionalizada, os convergentes encontram-se compreendidos entre os valores de  $x/L$  iguais a zero e um.

**Tabela 3.3 – Valores das coordenadas axiais adimensionalizadas onde se situam as secções de leitura dos perfis de velocidades**

Secção	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Coordenada axial $(x/L)^6$	-0,667	-0,444	-0,296	-0,148	0	$c/L$	0,926	1	1,07	1,23

A secção S6 refere-se à secção perpendicular ao contorno do convergente onde se situa o ponto de inflexão da superfície, que varia consoante o convergente em estudo, possuindo o valor da coordenada axial adimensional  $c/L$ . Assim, as dez secções perpendiculares ao contorno são comparáveis entre os diferentes convergentes por se situarem em secções com valores de  $x/L$  iguais, à exceção da secção associada ao PI cujo valor da abcissa varia consoante o valor de  $c/L$ , característico de cada convergente.

A título de exemplo, os perfis de velocidades característicos das dez secções referidas do convergente, relativas ao convergente  $c/L=0,20$  (representado na Figura 3.2) encontram-se apresentados para consulta nos gráficos das páginas 120 e 121, do capítulo Apêndices. A leitura dos perfis de velocidades, ao ser efetuada ao longo da secção transversal do domínio computacional, a resolução do perfil é maior nas imediações da parede do convergente, onde a malha é mais refinada. A determinação dos diversos parâmetros que caracterizam a CL depende da sua espessura ( $\delta$ ), pelo que a sua determinação deve ser feita da forma mais precisa possível de modo a propagar o menor erro possível aos parâmetros dependentes deste ( $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ ).

Para uma descrição mais pormenorizada do método utilizado para a obtenção dos parâmetros da camada limite ( $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ ), deve consultar-se a secção correspondente, no capítulo Apêndices.

### 3.3.2 Coeficientes de pressão e de atrito

Pretende-se estudar através de diferentes parâmetros os fenómenos que ocorrem no escoamento interior do convergente. Ao se analisarem três parâmetros simultaneamente identificam-

---

<sup>6</sup> Considera-se a secção de entrada do convergente como pertencente à origem das coordenadas axiais – coincidente com o eixo das ordenadas.

se os fenómenos que ocorrem no escoamento interior dos convergentes, sem margem para diferentes interpretações. A comparação é efetuada a partir dos seguintes parâmetros: a pressão estática ao longo da parede dos convergentes (coeficiente de pressão estática) e compará-la à pressão estática verificada sobre o eixo de simetria do convergente, a variação máxima da pressão estática associada a um gradiente adverso de pressão, a tensão de corte na parede (coeficiente de fricção) e o fator de forma do perfil. Os resultados são apresentados adimensionalizados segundo as coordenadas do eixo axial pelo comprimento dos convergentes.

### 3.3.2.1 Coeficiente de pressão estático

O coeficiente de pressão estática ( $C_{pe}$ ) na superfície do convergente é obtido através do cociente entre a diferença da pressão estática do ponto a estudar ao longo da parede sólida do convergente ( $P_w$ ) e uma pressão de referência definida como a pressão na secção de saída do convergente sobre o eixo de simetria ( $P_\infty$ ), e a multiplicação de metade da massa volúmica do ar ( $\rho$ ) e a velocidade média do escoamento verificada na respetiva secção a estudar do convergente ( $V_{avg}$ ) ao quadrado. A expressão é apresentada na equação 3.1, sendo a massa volúmica do ar considerada para a temperatura de 15 °C, com o valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

$$C_{pe} = \frac{P_w - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_{avg}^2} \quad (3.1)$$

A velocidade média a considerar no cálculo anterior ( $V_{avg}$ ) é obtida considerando o balanço médio da velocidade verificada à entrada e à saída do convergente. Desse modo o valor de  $C_{pe}$  devolvido, que tem como propósito ser calculado ao longo de todo o convergente, não seja excessivamente centrado no valor da velocidade verificada apenas na secção de entrada ou de saída do convergente.

A velocidade na secção de saída ( $V_2$ ) será diferente consoante a redução de áreas entre a secção de entrada e de saída do convergente. A velocidade à entrada do convergente (secção S5) possui o valor de 2,05 m/s, enquanto a velocidade à saída do convergente (secção S8) foi obtida através da equação da conservação da massa – equação 3.2 para os convergentes com o rácio de áreas de 9:1 e a equação 3.3 para os 4:1. Visto que a massa volúmica foi considerada constante para o nosso problema, a expressão conservação mássica é simplificada para a conservação de caudal. Deste modo os valores para  $V_2$ , consoante o rácio de áreas seja 9:1 ou 4:1, são respetivamente:

$$9:1 \rightarrow A_1 V_1 = A_2 V_2 \Leftrightarrow 9 A_2 V_1 = A_2 V_2 \Leftrightarrow V_2 = 9 V_1 \quad (3.2)$$

$$4:1 \rightarrow A_1 V_1 = A_2 V_2 \Leftrightarrow 4 A_2 V_1 = A_2 V_2 \Leftrightarrow V_2 = 4 V_1 \quad (3.3)$$

Assim, a velocidade média no convergente, é obtida através da expressão:

$$V_{avg} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (3.4)$$

Sendo o seu valor para cada um dos rácios de áreas casos respetivamente:

$$9:1 \rightarrow \frac{1}{2} (V_1 + 9 V_1) = 5 V_1 = 5 \times 2,050 = 10,25 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

$$4:1 \rightarrow \frac{1}{2}(V_1 + 4V_1) = \frac{5}{2}V_1 = \frac{5}{2} \times 2,050 = 5,125 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

Quanto ao gradiente de pressão, obtém-se o seu valor adimensional através da expressão seguinte:

$$\left. \frac{dP}{dx} \right|_w = \frac{dP/dx}{\frac{1}{2}\rho \Delta(V^2)/L_{conv}} \quad (3.7)$$

Em que a média das velocidades verificadas à entrada e à saída do convergente ao quadrado 3.8, consoante os rácios de áreas de 9:1 e de 4:1, retornam os seguintes valores:

$$\Delta(V^2) = |V_1^2 - V_2^2| \quad (3.8)$$

$$9:1 \rightarrow |V_1^2 - (9V_1)^2| = 80 V_1^2 \quad (3.9)$$

$$4:1 \rightarrow |V_1^2 - (4V_1)^2| = 15 V_1^2 \quad (3.10)$$

A determinação da taxa  $dP/dx$  é efetuada a partir dos valores de pressão estática através das diferenças finitas, a partir da série de Taylor

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \dots \Leftrightarrow f'(x) = \frac{f(x+h)-f(x)}{h} \quad (3.11)$$

Aplicando esta expressão aos dados obtidos para a pressão estática na parede do convergente obtém-se alcança-se o valor de  $dP/dx$ .

### 3.3.2.2 Coeficiente de fricção

Quanto à determinação da tensão de corte na parede do convergente, o seu valor adimensionalizado é dado pelo coeficiente de fricção:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V_{avg}^2} \quad (3.12)$$

Sendo a velocidade  $V_{avg}$  definida da mesma forma que descrita anteriormente para a pressão estática adimensional na superfície do convergente (equação 3.4). O valor da tensão de corte na parede,  $\tau_w$ , é obtido dos resultados das simulações computacionais.

De modo a verificar os resultados obtidos computacionalmente para  $C_f$  foi realizado o seu cálculo analítico. Consideraram-se iguais diâmetros e velocidades de escoamento aos casos estudados para uma conduta com rácio de áreas de 9:1. Assim, foi realizado o seguinte procedimento, para os diâmetros de entrada e de saída do convergente:

1. Cálculo do número de Reynolds;
2. Obtenção do fator de atrito de Darcy ( $f$ ) pelo diagrama de Moody (tubos lisos);
3. Determinação da tensão de corte ( $\tau_w$ ) na parede da conduta;
4. Determinação do coeficiente de fricção ( $C_f$ );
5. Comparação com os resultados obtidos pela ferramenta computacional.



Para a determinação do número de Reynolds foram considerados os diâmetros de entrada e de saída dos convergentes com rácio 9:1 estudados, com velocidade do escoamento à entrada de 2,050 m/s e à saída de 18,45 m/s, atendendo à equação de conservação de massa. O valor da viscosidade cinemática ( $\nu$ ) considerado é de  $1,51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Na determinação do fator de atrito de Darcy considerou-se escoamento para tubos lisos, visto não se ter adotado rugosidade para as paredes do convergente na modelação do caso numérico. Para a obtenção da tensão de corte a partir do fator de atrito recorre-se à equação 3.13.

$$f = \frac{8 \tau_w}{\rho V^2} \quad (3.13)$$

Por sua vez, de forma a se obter o valor do coeficiente de fricção, recorre-se à equação 3.12, considerando para valor de  $V_{avg}$  o determinado na expressão 3.5.

Computacionalmente, são obtidos os valores da  $\tau_w$  ao longo da superfície do domínio computacional, desde a secção S2 até à S10, calculando os valores de  $C_f$  da mesma forma que a descrita antes, analiticamente. Para a comparação são considerados os valores: para o diâmetro de entrada da conduta  $1,65 \times 10^{-4}$ , para o diâmetro de saída 0,0103. Estes valores são obtidos efetuando uma média dos valores verificados nos patamares de valores sensivelmente constantes à entrada e à saída dos convergentes (ver gráficos de  $C_f$  apresentados entre as páginas 78 e 79). Para o cálculo da média dos valores de  $C_f$  são considerados os valores adimensionais do eixo da abcissas,  $x/L$ , compreendidos no intervalo de  $[0,20; 0]$  para o patamar de entrada e no intervalo  $[2; 2,15]$  para o patamar de saída.

### 3.3.2.3 Aplicação do método

Para além do estudo das duas grandezas adimensionais mencionadas, apresenta-se em conjunto os valores obtidos para o fator de forma  $H$ , permitindo corroborar a avaliação e as conclusões obtidas através do estudo de  $C_{pe}$  e  $C_f$ . Desta forma evita-se equívocos nas interpretações aos resultados obtidos através dos três parâmetros. Pretende-se obter conclusões acerca do melhor formato para o contorno do convergente a implementar no túnel aerodinâmico. A comparação entre os valores computacionais obtidos para estes parâmetros será realizada ao longo da superfície do domínio computacional, desde a secção S2 até à S10 (consultar Tabela 3.3).

Pela observação da geometria do convergente é expectável que o gradiente de pressões seja sempre favorável, e consequentemente o escoamento não apresente tendência de se separar. No entanto junto da parede sólida do convergente poderá existir localmente variações no gradiente de pressões que influenciem o modo como o escoamento se desenvolve. Tendo em consideração que as condições de pressão junto às paredes do convergente influenciam em grande medida a ocorrência ou não de recirculações (como referido no capítulo 2.1.5.2), o estudo do  $C_{pe}$  junto à parede é fulcral para a determinação do contorno mais indicado.

Assim, de modo a detetar mais facilmente desvios em relação ao gradiente de pressão esperado, é comparado para valores de  $c/L$  e rácios de áreas diferentes quanto difere a pressão estática na parede  $C_{pe}$  sobre a superfície do convergente, com a observada sobre o eixo de simetria do convergente – assinalada como sendo relativa à linha central ( $\Phi$ ).

### 3.3.3 Intensidade turbulenta

A leitura dos valores da intensidade turbulenta ( $I_{turb}$ ) é realizada nas secções de entrada e de saída dos convergentes, obtida através da análise «*Post-processing*» no FLUENT. A determinação da  $I_{turb}$  depende de um valor de referência para a velocidade assumido, neste caso a média da velocidade verificada para cada uma das secções de leitura (ver equação 2.7).

Os valores da  $I_{turb}$  fornecidos pelo *Post-processing* não consideram a velocidade média em cada secção de leitura de forma automática, mas antes o valor de referência definido em *Reference values*. Assim, de modo a obter valores comparáveis de  $I_{turb}$  para cada secção a estudar, foi necessário definir como velocidade de referência ( $u_{ref}$ ) a velocidade média do escoamento em cada secção de leitura: a de entrada e a de saída do convergente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, analisa-se o escoamento numérico através da ferramenta comercial ANSYS FLUENT® 16.2. Os resultados apresentados dizem respeito ao estudo de condutas axissimétricas, de secção circular, com respeito ao ábaco do estreitamento hidráulico (Figura 7.5) de modo a comparar os resultados numéricos às medições experimentais de Levin; numa segunda fase estendem-se os resultados para o caso de uma conduta de secção retangular, do convergente a ser implementado no túnel aerodinâmico.

Neste capítulo começa-se por apresentar o processo de aprendizagem da ferramenta de geração de malha, a seleção do modelo de turbulência mais indicado e o estudo de independência da malha. De seguida, de modo a analisar e a comparar a qualidade do escoamento, resultante das diferentes geometrias possíveis para o convergente, recorreu-se à obtenção das seguintes grandezas: a distribuição de pressão estática para diversos casos ao longo da superfície dos convergentes ( $C_{pe}$ ); distribuição do coeficiente de atrito na superfície do convergente ( $C_f$ ); avaliação dos perfis de velocidades obtidos em diferentes secções dos convergentes estudados. A partir destes perfis foi possível calcular diferentes métricas para caracterizar a camada limite (CL) – obtendo-se valores distintos de  $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ .

Discute-se ainda o estudo dos diversos contornos para o convergente, desde os formatos propícios à existência de recirculações – zona interdita – inclusive a qualidade do escoamento; a perda de carga e a variação da intensidade turbulenta ocorrida entre as secções de entrada e de saída do convergente; o rácio de redução de área entre a entrada e a saída do convergente, com base nos rácios mais comuns (4:1 e 9:1); o método de interpretação do ábaco para condutas de secção não circular; o respetivo projeto do túnel aerodinâmico a construir e a modelação numérica da rede de redução de turbulência através de uma *UDF*.

### 4.1 Definição de malhas e modelos

Neste subcapítulo apresentam-se: métodos de geração de malha e as dificuldades na aprendizagem da ferramenta FLUID FLOW; o estudo de independência da mesma; a seleção do modelo de turbulência indicado para o caso em estudo.

#### 4.1.1 Apropriação da ferramenta de geração de malha, FLUID FLOW

Um dos objetivos centrais deste trabalho é a discretização do domínio computacional. A discretização é de elevada importância visto influenciar a qualidade dos resultados obtidos assim como a restante análise de resultados.

Existem diversas ferramentas computacionais de geração de malha. O *software* GAMBIT® era a ferramenta utilizada pelo NMFTA até a sua descontinuação na altura em que a ANSYS adquiriu a FLUENT. A ferramenta GAMBIT permitia um nível de controlo sobre a malha, a nosso ver, melhor do que do atual gerador de malha da ANSYS, o FLUID FLOW. No entanto, o GAMBIT tem como desvantagem o facto de parte considerável dos formatos de ficheiros por este gerados já não serem reconhecidos pelas atuais versões do FLUENT. Por esse motivo, e apesar da existência de outro programa, optou-se por aprender a ferramenta da ANSYS.

Esta dissertação é uma das primeiras na secção de MFTA a utilizar este *software* de geração de malha – tendo já Costa (2015) utilizando-o anteriormente na sua dissertação – pelo que se aproveita para detalhar nesta secção obstáculos encontrados e sua resolução no sentido de facilitar o seu uso em trabalhos futuros. Para além da ferramenta referida, existe outra ferramenta disponibilizada pela ANSYS para o mesmo efeito, o ICEM CFD, para a discretização de domínios computacionais mais complexos. A sua utilização não foi considerada necessária.

O presente subcapítulo tem por objetivo descrever a forma de construir corretamente e com qualidade (critérios de qualidade da malha na secção 2.2.4.1) as malhas computacionais no FLUID FLOW, e recorrendo às ferramentas descritas anteriormente no capítulo 3.2. É importante referir que as indicações seguintes têm como propósito serem empregues em simulações bidimensionais, embora não sejam exclusivamente para tal.

O domínio computacional não se restringe apenas ao domínio dos convergentes (em termos de comprimento axial) para que as condições fronteira das secções de entrada e de saída não criem estrangulamentos no seu interior, como já referido. No entanto pretende-se que o domínio não seja demasiado longo, necessitando inevitável de mais elementos para o ser possível discretizar. A licença de utilização do ANSYS apenas permitiu dispor de 512 000 células na geração das malhas. Este é um estrangulamento importante quanto ao nível de refinamento possível para a malha. Este facto, sublinha a importância de a malha ser mais grosseira nas restantes regiões que não são relevantes para o estudo.

O principal objetivo deste subcapítulo consiste em descrever a o processo de geração de malha, por forma a facilitar trabalhos futuros, e em determinar qual o melhor método automáticos de geração de malha a aplicar na criação da malha, dos proporcionados pelo FLUID FLOW (Tabela 3.1).

##### 4.1.1.1 Geração e otimização da malha

O modo como o domínio computacional é discretizado influencia consideravelmente a qualidade da solução para o escoamento a analisar. O domínio (bidimensional) pode ser repartido em diversas faces, sendo que faces de formatos diferentes comportam-se de diferente forma no processo de geração da malha do FLUID FLOW. Assim, procurou repartir-se o domínio de

forma a influenciar a malha gerada, por forma a se obter a discretização mais vantajosa do domínio, tendo em consideração a sua qualidade de acordo com os critérios de qualidade de malha apresentados no capítulo 2.2.4.1.

A divisão do domínio em faces considerou-se indispensável. Para além da sua potencialidade no controlo da criação da malha, verificou ser necessário para a aplicação de uma função criada pelo próprio utilizador mais tarde, uma *UDF (User Define Function)*. O intuito desta função é recriar os efeitos da perda de carga associados à presença da rede de alisamento de escoamento a montante do convergente, no que representaria a câmara de tranquilização.

Dentre as diversas repartições do domínio em faces, a que verificou ser mais benéfica – particularmente para o método de geração de malha escolhido, o *Quadrilateral Dominant*, descrito na página 56 – foi a criação de duas divisórias do domínio. Estas encontram-se representadas na Figura 3.1, perpendicularmente ao eixo axial: numa secção meio diâmetro a montante da secção de entrada do convergente e na secção de saída do convergente.

A criação do domínio bidimensional e respetiva divisão é efetuada através do *Solid Works*, ocorre num plano de coordenadas cartesianas e importado no *ANSYS DesignModeler*. É necessário ter em consideração que relativamente ao modelo o eixo de axissimetria tem de ser horizontal e estar sobre a ordenada  $y=0$ , para que seja possível aplicar o *Solver* axissimétrico ao modelo a introduzir no *FLUENT*.

Uma das primeiras decisões quanto à malha centra-se na escolha de tipo de elementos que se pretendem utilizar na discretização do domínio – entre Map, Pave, Quad e Quad/Tri – tendo sido testados inúmeros conjuntos de malhas e tipos de elementos. A escolha comumente privilegiada na literatura é a malha estruturada (Map), é empregue com a finalidade de garantir qualidade nos resultados. No entanto, em domínios onde a sua dimensão varie radialmente – variando o tamanho das secções ao longo do eixo axial do convergente, como no presente caso – leva à existência de elementos muito alongados e distorcidos nas regiões em que o convergente apresenta elevada curvatura, bem como nas regiões onde se pretende refinar a malha junto à parede sólida. Em ambas as situações, ocorrem valores muito elevados de *aspect ratio*, que se encontram patentes pelas malhas junto à superfície do convergente da Figura 7.1 a) e das Figuras 4.2 e 4.5 nas zonas de aplicação de Map.

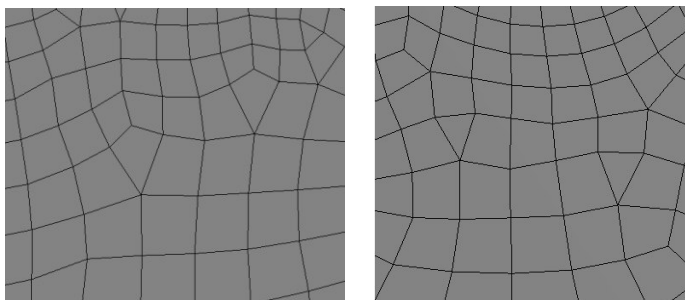
De modo a ser mais elucidativo acerca dos diferentes tipos de malha possíveis de criar (Map, Pave, Quad e Quad/Tri) apresentam-se nas Figuras das páginas 116 e 117 malhas geradas através dos diferentes métodos automáticos de geração de malha. As malhas das figuras são bastante grosseiras para permitir a visualização do tipo de elementos gerados. Esta decisão não evidencia no entanto a existência dos elementos extremamente alongados e distorcidos (como é típico das malhas do tipo Map por exemplo).

O Map leva à utilização de malha estruturada ao longo da região do domínio onde é aplicada, pelo que impede por um lado o refinamento necessário junto à superfície do convergente, bem como obriga à utilização desnecessária de malha demasiadamente refinada na região do escoamento médio. Estes impedimentos entram em conflito com o limite de células a ser respeitados para a criação da malha, assim como obrigam a um elevado esforço computacional sem que se beneficie com maior precisão nos resultados na região mais próxima da superfície do convergente.

O *Multizone* é privilegiado pela divisão do domínio em faces, isto porque caso identifique claramente zonas do domínio onde é possível aplicar malha do tipo Map isso é automaticamente feito. Com a consequência espetável de não ser uma mais valia tendo em conta o mau desempenho/ de não ser a malha apropriada para a aplicação de taxas de crescimento elevadas e variações dessas taxas ao longo do domínio (*Growth Rate* e *Bias*).

É portanto necessário um tipo de malha diferente, que permita que a mesma seja refinada junto da superfície do convergente. Isto significa, que ao contrário de uma malha do tipo Map, que contemple a introdução de células diferentes dos demais, permitindo o aumento do número de células segundo o sentido positivo do eixo radial, conforme a proximidade da superfície do convergente.

Nesse sentido, o aumento do número de elementos é possível através da aplicação de dois tipos de elementos, apresentados na Figura 4.1, sendo eles: quadriláteros distorcidos, ou triangulares. Os primeiros (apesar de serem um tipo particular de Quad) do tipo Pave, apresentam pouca qualidade de malha, segundo os critérios de qualidade apresentados no capítulo 2.2.4.1, enquanto os do tipo Tri são os que melhor se coadunam com o tipo de aplicação pretendida. São a melhor forma de se obter uma malha com a melhor qualidade possível na região junto à superfície onde se pretende analisar os fenómenos do escoamento mais importantes para o nosso estudo. Desta forma, a utilização da malha do tipo Pave foi descartada visto os elementos triangulares serem os que melhor se adaptam à malha nestas situações.



**Figura 4.1 – Tipo de elementos usados para aumentar o número de células segundo sentido positivo do eixo radial: Quad distorcidos (à esquerda) e Tri (à direita)**

Desta forma considera-se que uma malha constituída por elementos mistos é mais proveitosa. Um dos aspetos importantes para a criação de uma malha Quad-Tri bem sucedida (o mais «uniforme» possível e estruturada, se exequível), é que seja prioritariamente constituída por elementos quadriláteros. Os triangulares devem ser empregues principalmente com a finalidade de preencher o domínio em zonas de curvatura. À medida que a curvatura da superfície do convergente aumenta, também o número de elementos triangulares tende a aumentar, por forma a que a malha se adapte à geometria do convergente. Nesse sentido o FLUID FLOW apresenta dois métodos de geração de malha que são descritos de seguida.

O método de geração de malha *Multizone Quad/Tri Method* (inicialmente preferível, encontra-se representado na parte superior da Figura 4.2) permite repartir com facilidade o domínio de modo a gerar malha uniforme e, sempre que possível, utilizando malha estrutura nas faces onde não existe variação do diâmetro da conduta – desde que a divisão do domínio em faces

seja feita de forma correta. Trata-se de uma malha com qualidade, capaz de obter resultados bastante fiáveis, especialmente em regiões onde as linhas de corrente se encontrem alinhadas com o eixo axial, assim como com a malha estruturada. Nessas regiões o escoamento não tem componentes radiais de velocidades apreciáveis, pelo que as equações de governo apenas necessitam de transferir as suas condições às células a jusante.

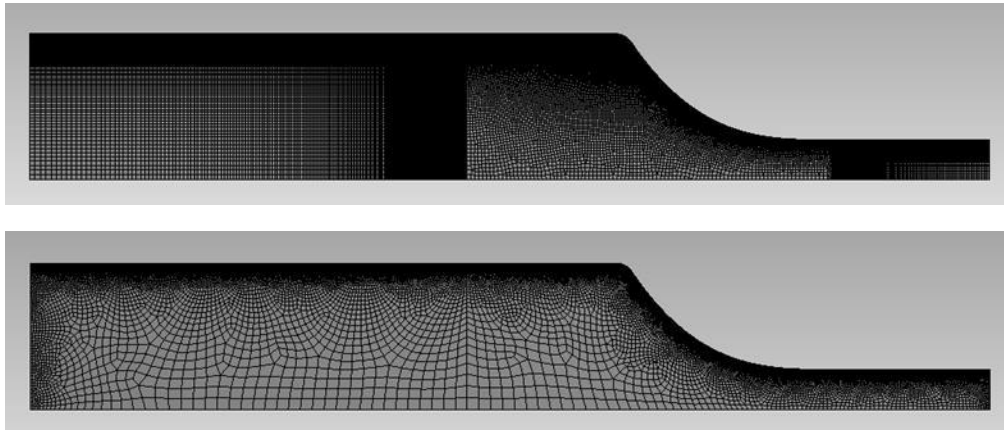
É essencial construir uma malha suficientemente fina para que seja possível capturar de forma adequada as rápidas variações em termos de velocidade e de pressão nas regiões que se pretende estudar. A malha estabelecida através do comando *Inflation* é do tipo Map – para proporcionar qualidade nos resultados – é constituída por 15 filas de elementos quadrangulares, considerado suficiente para captar os fenómenos presentes na camada limite (LEAP Australia Pty Ltd, 2012), em todo o comprimento da superfície exterior do domínio de modo a evitar perturbações acentuadas na malha e, conseqüentemente, nos resultados.

Os locais do domínio onde refinar a malha são de igual relevância aos em que se deve tornar a mesma mais grosseira. Devido ao limite de utilização de células permitido pela licença do programa ser de 512 000, teve-se de proceder à utilização de controlos de malha como o *Sizing* e o *Bias*.

No entanto, devido à necessidade de estudar com maior minúcia determinadas regiões do domínio, de modo a permitir poupar células a utilizar em regiões de malha a refinar, com taxas de crescimento entre elementos sucessivos elevadas e variáveis, verificou-se não ser o método mais indicado. Maioritariamente porque em regiões como essas, a malha não respeita os critérios para que uma malha se considere bem conseguida, em parte devido à aplicação de *Bias*. Visto que parte do domínio consistir em malha do tipo Map, a sua aplicação produz o efeito observado na zona central do domínio computacional da imagem superior da Figura 4.2.

Devido ao facto de se tratar de malha estruturada, a largura das colunas e linhas que formam a malha mantem-se constante ao longo dos eixos axial ou radial. Sendo o *Bias* empregue com o intuito de refinar a malha e torná-la grosseira conforme seja necessário, leva à criação de elementos como os verificados na zona central e extremos do domínio da Figura 4.2 – o mesmo efeito pode ser verificado com mais detalhe na Figura 4.5, após o fim do convergente. O refinamento exagerado na parte central da malha representada – entre outras regiões – implica: um *aspect ratio* muito elevado; elementos demasiado alongados, pelo que as células em causa não têm qualquer qualidade para efeitos de simulação, assim como uma taxa de crescimento entre células sucessivas demasiado elevada.

O método escolhido para a discretização do domínio foi o *Quadrilateral Dominant*, sendo apresentado na parte inferior da Figura 4.2 um caso de uma malha obtida por este processo. Cria uma malha com um aspeto menos «uniforme», devendo-se ao facto de ser constituída por elementos mistos de Quad-Tri, sendo maior a incidência do tipo Tri que nos casos apresentados anteriormente, sem deixar de utilizar por completo Pave – quadriláteros distorcidos. Apesar de despendar mais tempo para gerar a malha, permite um grau de maior controlo sobre a mesma.



**Figura 4.2 – Comparação de malha gerada: pelo método *Multizone Quad/Tri* (em cima) e pelo método *Quadrilateral Dominant* (em baixo)<sup>7</sup>**

O método *Quadrilateral Dominant* possibilita a aplicação de uma taxa de crescimento entre elementos adjacentes maior, através dos comandos *Bias* e *Growth Rate*, sem que sejam produzidas células que não respeitem os critérios de qualidade da malha. Aumenta-se dessa forma o nível de aproveitamento dos elementos que constituem a malha. Isto é, como se pode verificar pela Figura 4.2, a malha gerada através do método *Multizone* encontra-se mais refinada na região do escoamento médio, pelo que a malha gerada através de *Quadrilateral Dominant* permite com igual número de elementos refinar em mais do dobro a malha junto da superfície do convergente. Este é o principal motivo pelo qual foi escolhido o último método.

Considerou-se o facto de gerar malha ligeiramente mais refinada na face mais à direita do domínio, na região do escoamento médio que se encontra na saída do convergente, como se pode constatar pela imagem inferior da Figura 4.2. Tem-se por objetivo que essa face possua o número de elementos suficientes na direção radial do convergente, de modo a que a discretização do domínio seja suficiente de modo a obter-se um perfil de velocidades bem definido. Desta forma é possível distinguir a região do escoamento onde os efeitos viscosos, devido à interação da interface fluído-parede, da ação da inércia no restante escoamento.

---

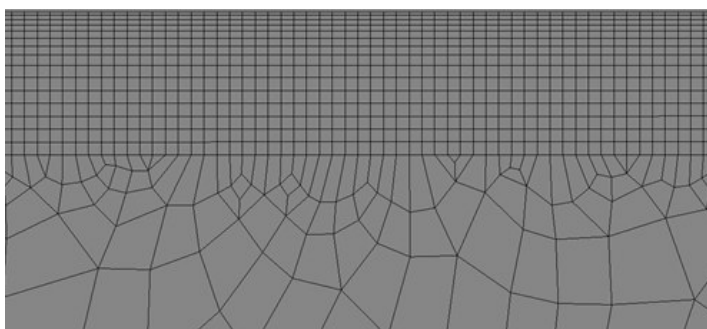
<sup>7</sup>De salientar que as geometrias representadas na figura são meramente indicativas do tipo de malha passível de ser gerada, visto que o domínio computacional é mais curto que o utilizado para as simulações computacionais, demonstrado na figura 3.1.



A correta implementação de malha estruturada junto à superfície do modelo através do comando *Inflation* deve obedecer a inúmeros critérios, descritos nos três parágrafos seguintes.

O crescimento entre os elementos na direção radial do domínio – que diz respeito ao parâmetro *Growth Rate*, não deve ser muito acentuado. Um dos locais críticos a evitar discontinuidades reside entre a malha estruturada da *Inflation layer* e a restante fora desta. Dessa forma a taxa de crescimento definida em ambas deve ser a mais semelhante possível de forma a evitar o tipo de discontinuidades demonstradas na Figura 4.3.

Ao existir um limite para a taxa de crescimento entre elementos sucessivos, implica a existência, igualmente, de um limite ao número de elementos que é possível reduzir por unidade de área do domínio, através do rápido crescimento da malha. Este fator implica por sua vez que exista um limite até o qual é possível refinar a malha junto à superfície do convergente sem que se ultrapasse o número limite de elementos – constrangimento que será abordado (e trará consequências) no capítulo 4.1.3: Estudo de independência da malha.

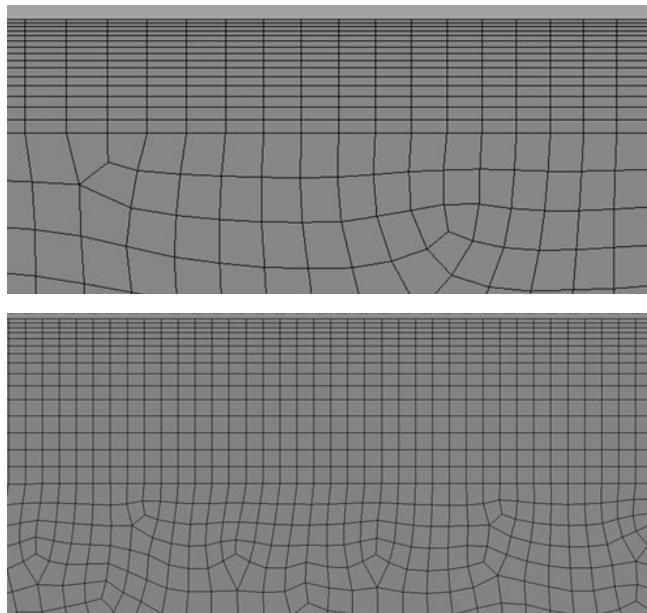


**Figura 4.3 – Malha utilizando um *Growth Rate* de 1,20 (demasiado elevado) leva a estiramentos da malha na interface com a malha estruturada aplicada na CL**

Os elementos a serem obtidos na última fila da *Inflation layer*, devem já ter um formato próximo de um quadrado, pois como se verifica na Figura 4.4, se assim não for existe como que uma discontinuidade na interface das células pertencentes à malha estruturada e as restantes com um crescimento das células na direção radial que não é uniforme, excedendo a razão de crescimento de dois nessa direção do domínio.

Um dos procedimentos mais demorosos para o correto ajuste da malha é a definição dos vários parâmetros necessários à criação da malha, com o grau de refinamento desejado. Embora a metodologia seja a mesma para diferentes geometrias de convergentes, para isso ser alcançado com sucesso, é necessário que para cada espessura que se queira atribuir diferente às células que constituem a superfície exterior da CL do convergente (*first layer thickness*), e consequentemente seu valor de  $y^+$ , definir várias outras dimensões que são decorrentes desta, de forma a manter a proporcionalidade da malha e respetiva qualidade, sendo elas: o comprimento axial das células ao longo da CL, na face pertencente ao convergente, assim como nas outras duas faces laterais de modo a aumentar nestas últimas as dimensões dos elementos, de forma a diminuir o seu número e a garantir em simultâneo que, com a utilização do *Bias* (também possível observar na Figura 4.4), os elementos adjacentes em faces diferentes tenham a mesma dimensão de forma a existir um crescimento gradual entre as células em contacto umas com as

outras segundo a dimensão axial; para além de ser necessário ajustar as dimensões das células nas secções de entrada e de saída de modo a cumprirem o mesmo requisito de crescimento uniforme mas segundo a dimensão radial do domínio. Todas as dimensões descritas, além e garantem os aspetos descritos, têm de garantir a proporcionalidade nos vários elementos da CL e fora dela, de forma a manter o valor do *aspect ratio* inferior a 5, tal como no processo de otimização demonstrado na Figura 4.4, onde se pode observar na imagem da parte superior que os elementos na superfície externa do domínio não respeitam tal condição. Esta simultaneidade de fatores a respeitar é o que torna demoroso o processo de geração de malhas com diferentes valores característicos de  $y^+$ .

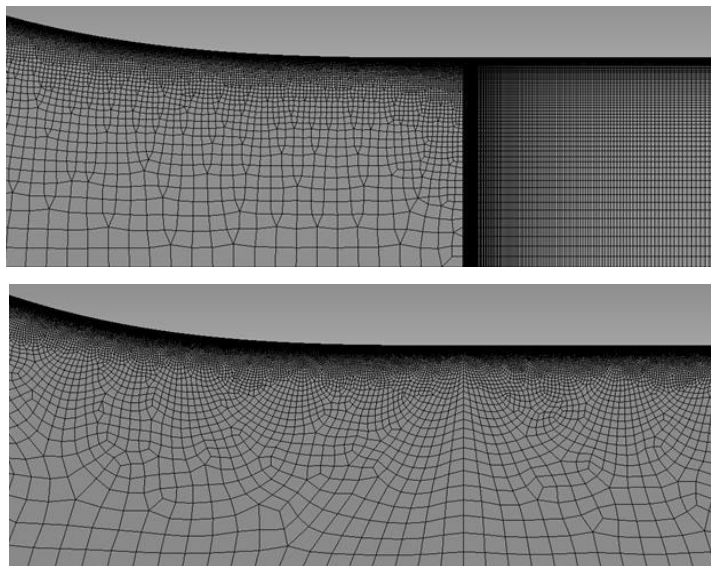


**Figura 4.4 – Otimização da malha pertencente à CL: importância do crescimento de forma uniforme e a proporção dos lados das células na CL**

O pormenor da malha junto à parede do convergente, pretende recriar o efeito demonstrado pela malha de discretização usada no trabalho de Leifsson e Koziel (2015), próximo das paredes, apresentada na secção 2.2.4, Figura 2.17 b).

Da mesma forma que considerou importante o uso de malha com crescimento do tamanho dos elementos ao longo de todo o domínio, também se o considerou importante ao longo das linhas que limitam exteriormente o domínio. Através do comando *Sizing*, que permite dividir a linha em comprimentos definidos pelo utilizador, com recurso ao *Bias*, que possibilita que essa divisão seja feita com uma taxa de crescimento do espaçamento entre os vértices das diversas células. O seu uso, conjugado com o aumento do valor de  $y^+$  - a altura das primeiras células a contabilizar desde a superfície exterior – por forma a manter a proporcionalidade das células e o *aspect ratio* abaixo dos 5 para 1, permite poupar elementos junto dos extremos do domínio computacional. A intenção é que, a malha seja a mais refinada possível junto à superfície exterior do convergente e se «poupe» elementos nas restantes localizações da malha, sem que exista descontinuidades, assimetrias e outros fator que diminuam a qualidade da mesma (como os

verificados no caso da parte superior da Figura 4.5). Desta forma, ambas as malhas apresentadas na figura abaixo têm as mesmas definições de *Sizing* aplicadas na camada-limite dos modelos, mas obtendo-se resultados bem distintos quanto à qualidade global da malha e do número de elementos, consoante foi utilizado o método *Multizone Quad/Tri* ou *Quadrilateral Dominant*.

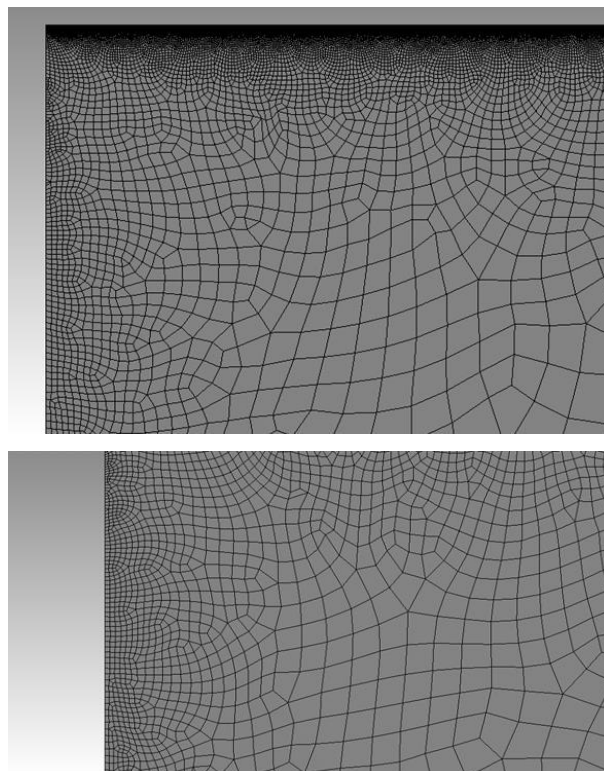


**Figura 4.5 – Efeito do comando *Sizing* na secção de saída de convergentes para malhas geradas por diferentes métodos: *Multizone Quad/Tri* (em cima) e *Quadrilateral Dominant* (em baixo)**

Outro fator a tido em consideração foi as malhas serem ligeiramente refinadas junto às secções de entrada e de saída, de modo a que as condições fronteira aplicadas nessas secções não interfiram negativamente com o escoamento no centro do modelo, restringendo-o em demasia. Para isso, o domínio necessita de se ter bastantes células segundo a direção axial junto a estas secções, como retratado na Figura 4.6, por forma, a que as equações de governo se adaptem rapidamente ao escoamento no interior domínio, em forma de conduta. O refinamento na direção radial domínio foi necessário para manter a proporcionalidade entre os lados dos diversos elementos.

Como também se verifica na mesma figura, nas secções de entrada e de saída também é utilizado o *Bias* por forma a tornar as células de maior dimensão junto ao eixo de simetria do domínio, por óbvios motivos de redução do número de elementos nessa região, e células de dimensões reduzidas junto à superfície exterior de modo a existir um crescimento contínuo e uniforme da dimensão dos elementos desde a CL até ao eixo do convergente.

As malhas criadas através do método automático *Multizone*, o *Surface mesh method* selecionado não constituiu grande diferencia na geração das malhas, verificando-se de facto diferença entre os diferentes *Free face mesh type* selecionados. Foram testadas as diversas malhas de discretização possíveis de ser geradas para o volume no interior do convergente (apresentadas nos Apêndices, nas Figuras 7.1 e 7.2, das páginas 116 e 117) através dos diversos métodos automáticos de geração de malha, mencionados na Tabela 3.1.



**Figura 4.6 – Pormenor da malha refinada junto da secção de entrada e simultâneo crescimento desde a camada-limite**

De entre as várias malhas criadas e testadas, o método automático de geração de malha *Multizone Quad/Tri, Program Controlled*, com malha do tipo Quad/Tri, que consiste na combinação de elementos quadriláteros e triangulares, foi a utilizada para o nosso estudo.

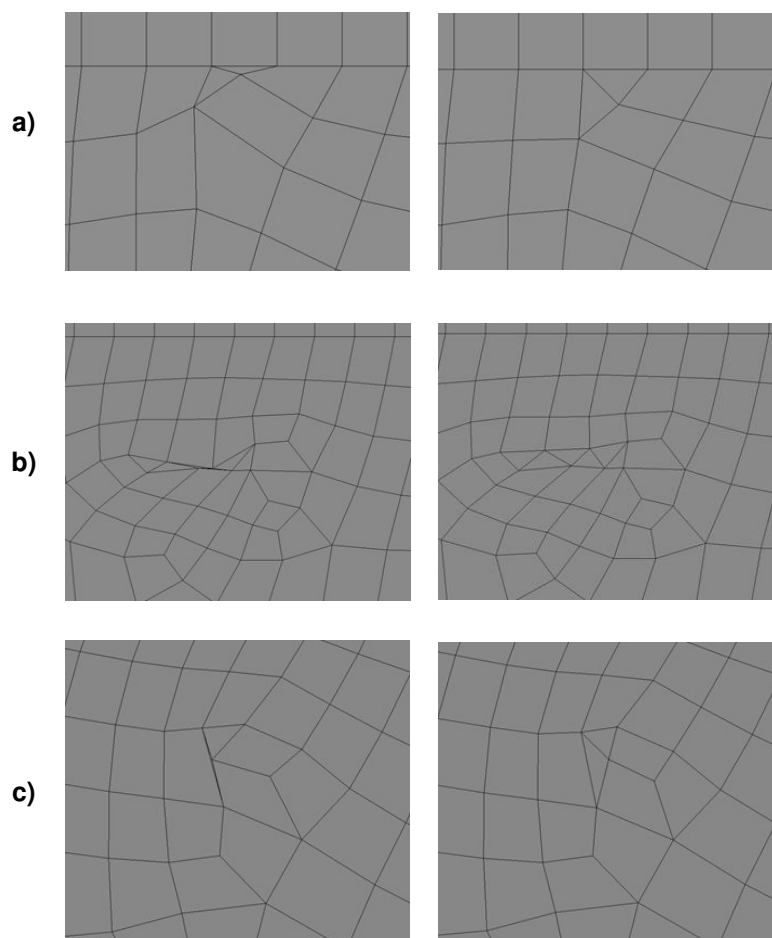
#### 4.1.1.1.1 Problemas no uso do FLUID FLOW para a geração de malha

Apesar dos esforços para se obterem malhas de boa qualidade, muitos dos problemas por elas evidenciados, não se deveram aos parâmetros escolhidos, não podendo estes ser controlados aquando da sua criação. Seguem-se alguns dos problemas (aleatórios) mais recorrentes, que surgiram na geração de malhas.

- Malhas com elementos pontualmente muito distorcidos, que têm de ser corrigidos manualmente (Figura 4.7), por forma a garantir que não existem elementos com um *Aspect Ratio* superior a 5, e de preferência não superiores a 3.

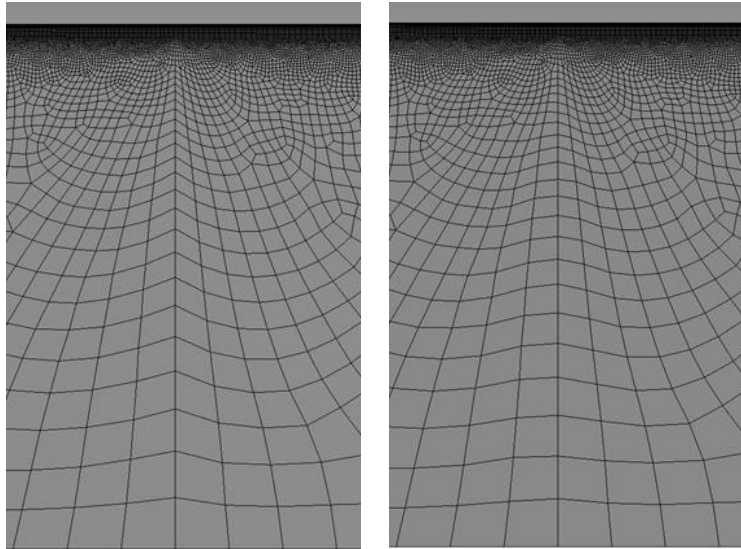
Frequentemente, devido ao elevado nível de distorção dos elementos da malha (que se traduz em *Aspect Ratio* ou *Skewness* muito elevados), por norma em elementos triangulares, foi necessário proceder à retificação manual dos elementos. Esta alteração, foi efetuada recorrendo ao comando *Mesh Edit: Node Move*. A malha é manipulada, tendo em consideração um dos seguintes critérios: assemelhar-se à figura regular (quadrado ou triângulo equilátero) e divisão dos ângulos em torno de um nó de forma equitativa. De referir que, a probabilidade de encontrar

elementos com distorções severas é maior nos casos onde se pretende refinar mais a malha junto às paredes superfície, nas zonas de curvatura do convergente.



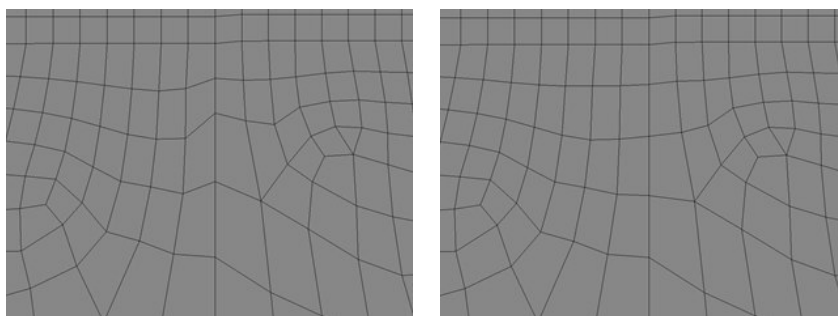
**Figura 4.7 – Pormenor de elementos distorcidos - à esquerda - e consequentemente corrigidos - à direita: células dos casos a) e b) próximas à CL e do caso c) interior ao domínio**

- Conjunto de células, alinhadas com uma das divisórias do domínio (uma das faces células sobre uma das divisórias representadas na Figura 3.1, com os índices “G” e “J”), demasiado angulosas: Figura 4.8. Esta característica indesejada ocorre no interior do convergente, na zona do escoamento médio, onde seria de todo vantajoso obter uma malha o mais semelhante possível com uma malha estruturada. Deve-se modificar a malha por forma a alinhá-la com o escoamento, diminuindo os possíveis erros associados às equações governantes do escoamento. Este conjunto excessivo de células, com ângulos angulosos junto aos nós sobre a divisão do domínio, é desnecessário, pois deveria ser possível introduzir mais células, de modo a criar células com ângulos muito próximos de ângulos retos. Ao contrário do que acontece no GAMBIT, onde basta diminuir o nível de *Smoothing* da malha, no FLUID FLOW a diminuição do peso desse mesmo parâmetro não produz qualquer influência na malha obtida. Assim, teve-se de se proceder ao «alisamento» das células angulosas individualmente na malha, corrigindo a posição dos nós manualmente.



**Figura 4.8 – Suavização do ângulo entre elementos adjacentes mas em lados opostos da linha divisória do domínio**

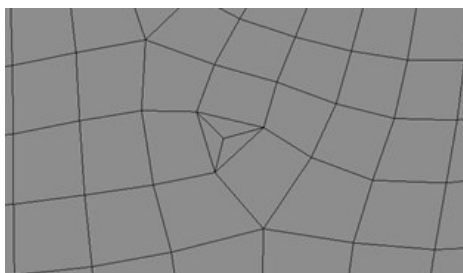
- Células distorcidas junto às zonas de aplicação de *Inflation*: criação de malha estruturada junto à superfície dos convergentes, por forma a capturar da melhor forma os fenómenos, as flutuações e os vórtices no interior da camada limite. As distorções possuem especial incidência nas secções onde se aplica uma divisão na malha (representadas na Figura 3.1), sendo um caso apresentado na Figura 4.9. A distorção apresentada tem, como efeito, aumentar em muito o ritmo de crescimento da malha na direção perpendicular à superfície. Assim, infringe-se o critério de qualidade da malha, em que entre elementos consecutivos, um deles não deve possuir o dobro do comprimento do antecessor, i.e., de não ultrapassar o crescimento entre elementos consecutivos em mais do dobro. Este fenómeno é mais grave nas malhas com *Growth Rate* mais elevado: para valores superiores a 1,15.



**Figura 4.9 – Retificação da malha na separação de faces, junto à CL, em termos das coordenadas radiais dos nós**

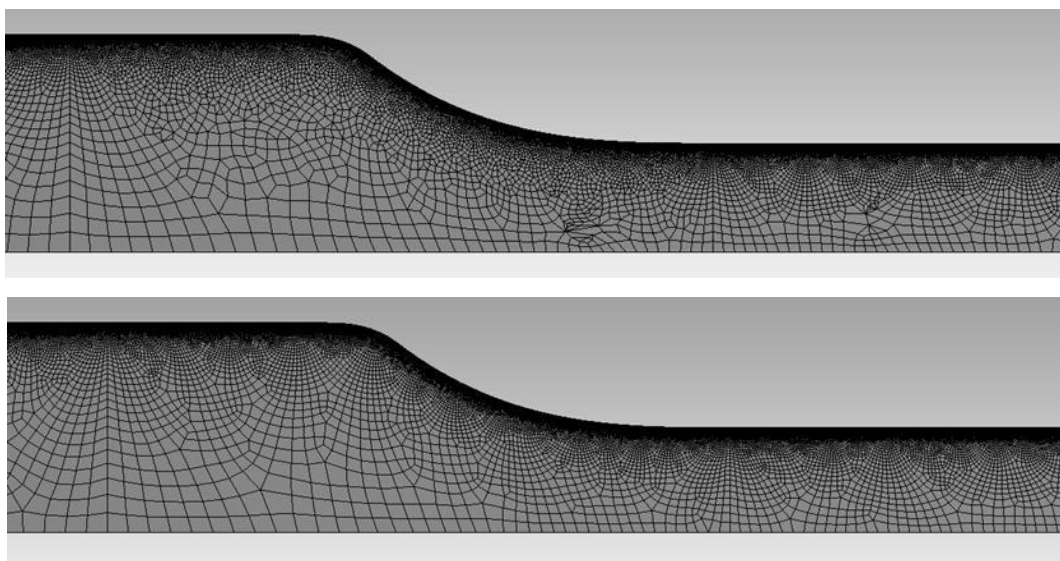
- Conjunto de células desnecessário, formado por três elementos triangulares, como o da Figura 4.10. Compõem uma geometria perfeitamente evitável, substituível por um único elemento triangular. «Manualmente» esse processo não é possível de se realizar, pelo que toda a malha tem de ser gerada novamente, bastando ligeiríssimas alterações nos parâmetros seleccionados

para se obter uma malha diferente da anterior. Uma dessas alterações pode ser, por exemplo, a dimensão máxima da face das células (*Max Face Size*).



**Figura 4.10 – Repartição desnecessária de região quase triangular em elementos Tri**

- Devido ao «desacerto» entre o número de elementos que dividem as linhas exteriores do domínio e o número de elementos que dividem as linhas limítrofes associadas ao eixo de simetria, criam-se malhas do tipo da apresentada na Figura 4.11. Embora, supostamente as malhas geradas com recurso a *Quadrilateral Dominant*, devessem ter a capacidade de se adaptar e discretizar o domínio de forma a se obter uma malha mais ordenada, recorrendo para isso a elementos do tipo Tri, isso muitas vezes não se verifica. Este efeito provou ser mais frequente em malhas em que se aumentou o refinamento.



**Figura 4.11 – Defeitos comuns em malha gerada sem os inúmeros parâmetros otimizados e a respetiva malha corrigida**

- Por vezes, o gerador de malha FLUID FLOW não permite, durante o processo de criação da malha, repartir o domínio com elementos quadriláteros. Assim, uma (ou mais) das três faces que compõem o domínio fica unicamente preenchida por elementos triangulares, ou, por um conjunto de elementos Quad e Tri, com predominância para estes últimos. Uma vez mais, este resultado deve-se, provavelmente, ao facto de o número de divisórias ao longo do bordo superior do domínio (exterior) não corresponder a um múltiplo par do número de divisórias ao longo do

bordo inferior do domínio (relativo ao eixo de simetria). Apresentam-se os exemplos entre a) e e) da Figura 7.3, dos Apêndices, relativamente a malhas para uma mesma geometria, cujas espessuras das células adjacentes à parede – pertencentes à CL – são de 0,085 mm e de 0,075 mm, e um *Growth Rate* de 1,15. É possível obter uma malha aceitável, com uma maior predominância de elementos do tipo Quad, ao definir valores diferentes para as dimensões máximas das células do domínio computacional. A malha corrigida é apresentada na Figura 7.3 f).

#### 4.1.2 Seleção do modelo de turbulência

Os resultados das simulações numéricas são muito condicionados pelo tipo de modelos utilizados para a resolução. Neste sentido, a escolha correta do modelo de turbulência é fulcral. Sendo o principal objetivo das simulações detetar possíveis vórtices e recirculações gerados no escoamento interior dos diferentes convergentes, pretendeu-se dessa forma descobrir quais os modelos de turbulência que identificam a existência de uma bolha de recirculação na parte inicial do convergente, assim confirmando as indicações presentes na literatura.

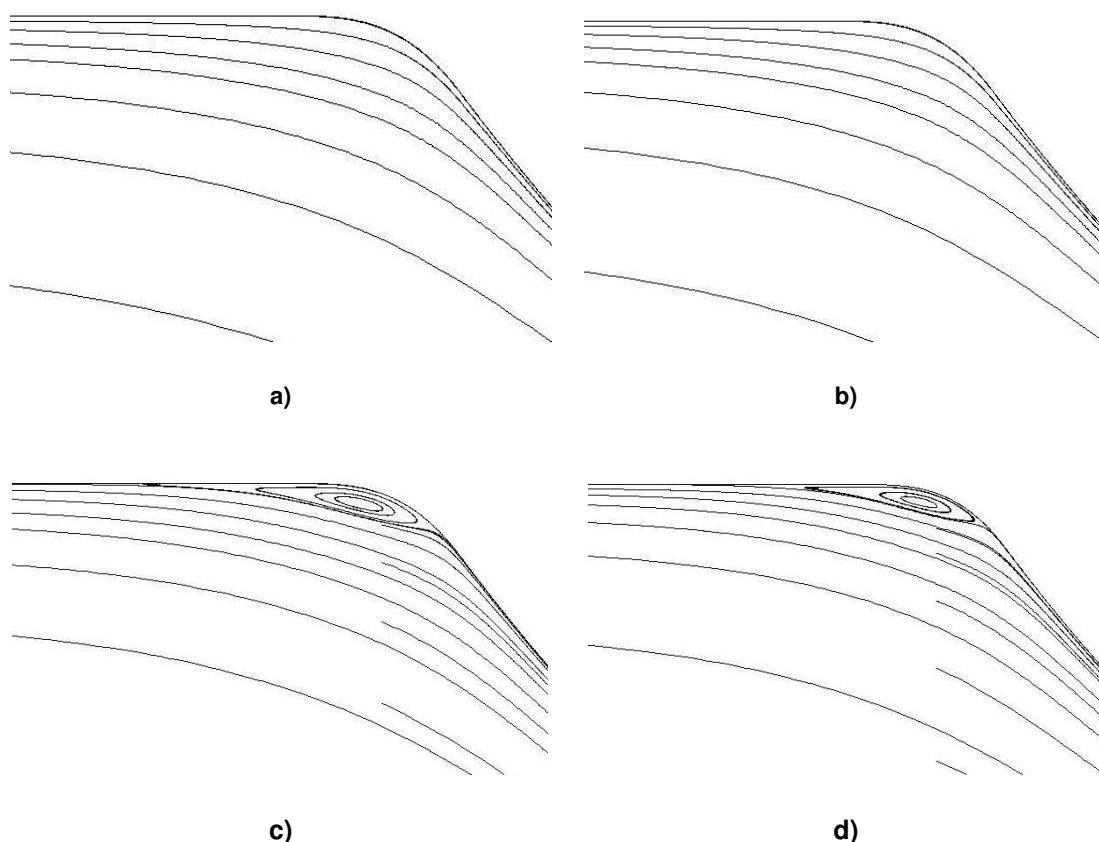
Deste modo, compararam-se os resultados obtidos de simulações 2D acerca de um convergente que se encontra na “Zona Interdita” do ábaco do estreitamento hidráulico, associado às suas coordenadas  $c/L=0,11$  e  $D_o/D=3$  ( $L/D_o=0,75$ ). O convergente modelado apresenta uma redução de áreas na ordem de 3 para 1, possuindo as seguintes dimensões: diâmetro de entrada de 1200 mm, diâmetro de saída de 400 mm e comprimento de 900 mm.

Compararam-se os resultados correspondentes aos seguintes modelos de turbulência:  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\omega$  padrão e  $\kappa$ - $\omega$  SST. Foram utilizadas funções de parede nos modelos  $\kappa$ - $\epsilon$ , embora para o grau de refinamento da malha seja expectável a resolução das equações de governo do escoamento dentro da própria camada limite, facilitando a obtenção de resultados exatos. De notar que se espera visualizar claramente uma bolha de recirculação promovida pelo «ponto anguloso» presente na entrada do convergente.

Para os controlos de solução do FLUENT (*Solution Controls*) foram definidos vários valores para os fatores de relaxação. Os seus valores utilizados quer nestes casos, quer nas restantes simulações realizadas no âmbito deste trabalho, salvo raras exceções por motivos de convergência, foram: 0,315 para a pressão, entre 0,77 e 0,84 para a quantidade de movimento (*momentum*), entre 0,88 e 0,96 para a energia cinética turbulenta, e para a taxa de dissipação turbulenta, e 1 para a massa específica, forças mássicas e viscosidade turbulenta. Os resultados apresentados de seguida, na Figura 4.12, relativos aos quatro modelos de turbulência distintos, consistem na análise das linhas de corrente do escoamento.

De notar que em ambas as Figuras 4.12 a) e b), não se verifica bolhas de recirculação ou distúrbios nas linhas de corrente próximas à parede do convergente, indicadores da existência de turbilhões no escoamento a jusante. Verifica-se desta forma que os métodos baseados no modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  (modelo padrão e RNG), mesmo utilizando as funções de parede, não são uma boa escolha pois não detetam convenientemente os fenómenos do escoamento que ocorrem junto à superfície do contorno.





**Figura 4.12 – Pormenor das linhas de corrente à entrada do convergente  $c/L=0,11$  obtidos com os modelos de turbulência: a)  $\kappa$ - $\epsilon$ , b)  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG, c)  $\kappa$ - $\omega$ , d)  $\kappa$ - $\omega$  SST**

Já os resultados obtidos com base no modelo  $\kappa$ - $\omega$ , é possível observar o contorno da bolha de recirculação através da interpretação das linhas de corrente. O modelo  $\kappa$ - $\omega$  padrão, Figura 4.12 c), é o que reproduz com maior exatidão as características do escoamento junto às superfícies do contorno, sendo importante para capturar os vórtices e recirculações que se formam junto à parede. A sua desvantagem é na análise de escoamentos abertos ou a zona central do escoamento em condutas – escoamento médio. Apesar de se pretender observar com o maior detalhe possível o escoamento junto à superfície do convergente, tem-se também por objetivo, efetuar leituras dos perfis de velocidades ao longo de diversas secções transversais do convergente, por forma a serem empregues no cálculo de métricas para a avaliação do escoamento. Nesse sentido, é necessário um modelo que recrie com exatidão as condições do escoamento médio, tal como os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$ .

Como tal, o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST de Menter (Fluent Theory Guide, 2011), apresentado na Figura 4.12 d), apresenta-se como o melhor modelo a utilizar, ao reunir o melhor dos modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  e  $\kappa$ - $\omega$ : recorre predominantemente a este primeiro modelo para o tratamento do escoamento médio e ao segundo para a resolução das equações que governam o escoamento próximo das superfícies, através de uma equação de balanceamento.

### 4.1.3 Estudo de independência da malha

O estudo de independência da malha foi realizado para a geometria do convergente correspondente ao ponto do ábaco do estreitamento hidráulico de coordenadas  $L/D_0=1,125$  e  $D_0/D=3$  (isolinha  $c/L=0,20$ ). Possui diâmetro de entrada de 1200 mm, de saída de 400 mm e de comprimento 1350 mm. É assumido que as conclusões obtidas no estudo da independência da malha deste caso sejam equivalentes para os casos dos restantes convergentes – apesar das geometrias dos diversos convergentes serem distintas – visto se manterem as proporcionalidades existentes entre os elementos constituintes da malha, assim como os coeficientes dos parâmetros do FLUID FLOW para a construção das malhas. Deste modo, os resultados deste estudo consideram-se representativos dos convergentes analisados no presente trabalho.

Na realização do teste foram utilizadas seis densidades de malhas diferentes. Cada qual encontram-se associada a um valor distinto de espessura para as células adjacentes à superfície do convergente ( $h$ ) e a distintos valores de  $y^+$ . As espessuras  $h$  avaliadas foram: 4,5 mm; 1,0 mm; 0,30 mm; 0,15 mm; 0,10 mm e 0,085 mm.

Os critérios de qualidade de malha, descritos na secção 2.2.4.1, e respetivo número de elementos que constituem as seis malhas de diferentes densidades, encontram-se apresentados na Tabela 4.1. A principal diferença entre as diferentes malhas analisadas deve-se à densidade dos elementos adjacentes à superfície do convergente. A dimensão das células junto ao eixo de simetria é praticamente igual. Procurou-se evitar-se a existência de elementos altamente distorcidos nas malhas geradas.

**Tabela 4.1 – Critérios de qualidade e número de elementos das malhas usadas no estudo de independência de malha**

N.º elementos	$h$ (mm)	Aspect Ratio (máx)	Element Quality (mín)	Skewness (máx)	Orthogonal Quality (mín)	$y^+$ (P.I.)	$y^+$ máx
6 582	4,5	4,546	0,404	0,605	0,6417	27,3	136
44 146	1,0	4,561	0,341	0,673	0,5003	7,35	29,4
154 167	0,30	4,561	0,317	0,749	0,5400	2,20	8,79
310 201	0,15	4,565	0,358	0,699	0,5317	0,889	4,44
459 836	0,10	13,38	0,134	0,988	0,1463	0,588	2,94
496 265	0,085	4,488	0,256	0,871	0,4012	0,492	2,46
<b>Limite: 512 000</b>							

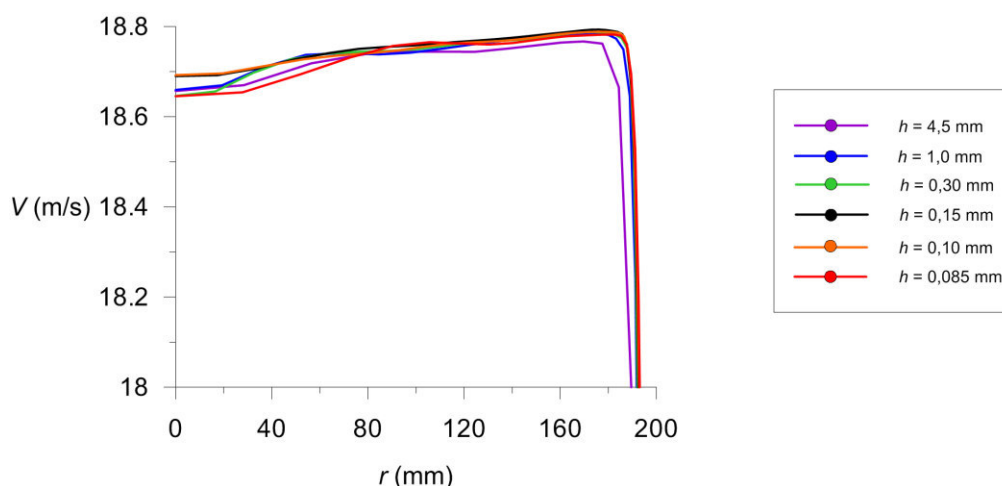
Por forma a complementar a informação sobre a qualidade das malhas produzidas, apresentam-se os valores médios para os critérios de qualidade de malha, da malha relativa ao caso de  $h=0,15$  mm – a título de exemplo – na Tabela 4.2. Como é possível verificar, são indicadores de uma malha de bastante qualidade, tendo em conta os requisitos de cada critério de qualidade de malha apresentados na Tabela 2.1.

Os resultados do estudo paramétrico baseado na comparação do perfil de velocidades do escoamento à saída do convergente (fronteira *Nozzleout*) são apresentados na Figura 4.13. Note-se que a malha gerada próximo do eixo de simetria do convergente é muito mais grosseira que no interior da CL, pelo que os resultados obtidos nessa região são menos precisos.

**Tabela 4.2 – Quantificação dos valores médios dos critérios de qualidade da malha  $h=0,15$  mm**

$h$ (mm)	Valores médios			
	Aspect Ratio	Element Quality	Skewness	Orthogonal Quality
0,15	1,440	0,864	0,0760	0,9880

Os perfis de velocidades, representados na Figura 4.13, são ampliados de forma a serem visíveis as diferenças entre eles. A comparação demonstra que o escoamento é tendencialmente uniforme na maioria da área da secção de saída do convergente, mostrando uma redução abrupta da velocidade para valores de raio da conduta superiores a 170 mm (influência da CL), adjacente à parede sólida do convergente ( $r=200$  mm). Note-se que nos perfis de velocidades completamente desenvolvidos, o ponto onde se verifica a velocidade máxima do escoamento não é próximo do eixo de simetria axial ( $r=0$  mm), mas mais próximo da parede, no limiar da CL, ao contrário do que se poderia julgar inicialmente.

**Figura 4.13 – Estudo paramétrico dos perfis de velocidades verificados na secção de saída do domínio para diversos níveis de refinamento de malha**

O estudo paramétrico baseado nos perfis de velocidades sugere que a solução não é independente da densidade das malhas estudadas, pelo menos para malhas mais grosseiras do que a malha com a espessura de  $h=0,30$  mm junto à parede (considerando apenas a segunda metade exterior do raio do convergente, onde o perfil de velocidade é descrito com maior fidelidade). Recorde-se que, motivado pelo limite do número de elementos disponíveis pelo ANSYS para a geração das malhas de discretização, não foi possível continuar o refinamento da malha para este estudo de independência. A malha com valor de  $h$  de 0,085 mm é constituída por 496 265 elementos e 506 241 nós, próximo do limiar dos 512 000 possíveis.

Tendo em consideração que este estudo de independência foi realizado para um convergente com  $c/L$  com valor de 0,20, tal implica que os convergentes caracterizados por valores de  $c/L$  superiores têm um domínio mais comprido (como referido na secção 2.1.4, implica valores mais elevados de  $L/D_0$ ). Isto significa que para o convergente caracterizado por  $c/L=0,99$ , uma malha que discretizar o domínio de  $h=0,15$  mm possui 433 017 elementos, sendo que o caso

$h=0,10$  mm ultrapassa já o limite dos 512 000 elementos. Assim, a malha mais refinada para a qual é possível utilizar a mesma densidade entre todos os tipos de convergentes a estudar possui  $h$  igual a 0,15 mm (sendo um dos motivos da sua escolha).

**Tabela 4.3 – Resíduos obtidos para diferentes malhas no estudo de independência**

N.º elementos	$h$ (mm)	Resíduos				
		Continuidade (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade $x$ (m/s)	Velocidade $y$ (m/s)	$\kappa$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\omega$ (kg/(m.s))
6 582	4,5	$8 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$
44 146	1,0	$7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$
154 167	0,30	$7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$
310 201	0,15	$7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$
459 836	0,10	$9 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$
496 265	0,085	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$9 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-7}$

Por forma a obter resultados mais precisos, seria necessário criar malhas com um crescimento mais agressivo junto às paredes do contorno (*Growth Rate* mais elevado) assim gerando malhas mais refinadas. Apesar de isso ser possível, a qualidade da malha resultante nesses casos ficou aquém das expectativas (como discutido no subcapítulo 4.1.1.1). Assim, o grau de crescimento da malha considera-se limitado, não sendo suficiente para permitir analisar malhas mais refinadas, próximo das paredes do contorno. De referir que, quanto mais refinada a malha a criar (menor valor de  $h$ ), mais recorrente é o aparecimento de anomalias na malha gerada do tipo das representadas na Figura 7.3.

A ordem de grandeza dos resíduos alcançados nas simulações do estudo de independência de malha são apresentados na Tabela 4.3, constituindo indicadores da qualidade das simulações computacionais efetuadas.

**Tabela 4.4 – Resultados de diversos parâmetros para malhas com diferentes níveis de refinamento**

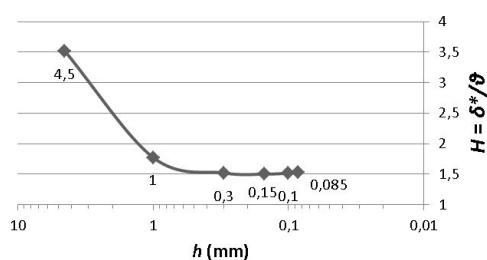
N.º elementos	$h$ (mm)	$l_{\text{turb}}$ (E) %	$l_{\text{turb}}$ (S) %	$l(E)/l(S)$	$\delta$ (mm)	$\delta^*$ (mm)	$\theta$ (mm)	$H$	$y^+$ (P.I.)	$y^+$ máx
6 582	4,5	4,747	1,294	0,2726	15,0	3,36	9,55	3,52	27,3	136
44 146	1	4,743	1,226	0,2584	10,8	1,98	1,11	1,77	7,35	29,4
154 167	0,3	4,599	1,198	0,2605	10,0	1,76	1,16	1,52	2,20	8,79
310 201	0,15	4,502	1,219	0,2707	9,92	1,76	1,17	1,50	0,889	4,44
459 836	0,1	4,449	1,236	0,2800	9,74	1,72	1,13	1,52	0,588	2,94
496 265	0,085	4,285	1,235	0,2882	9,48	1,67	1,09	1,53	0,492	2,46

O valor de  $y^+$  aconselhado pela literatura é inferior a 1 para este tipo de estudos de engenharia. Nos estudos de Leifsson e Kozziel (2015) e de Lastra et al., (2013), também sobre convergentes para túneis aerodinâmico, a distância do primeiro nó em relação à parede ( $h$ ) foi definida de tal forma que se verifica  $y^+ < 1$  (cerca de 0,297 no segundo estudo), para todo o domínio

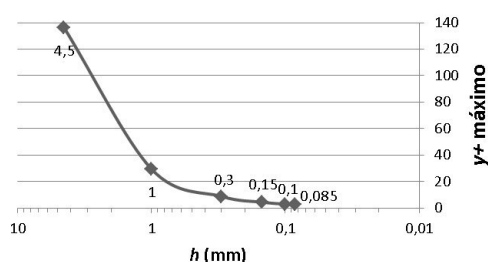
computacional. São comparados os valores de diferentes grandezas e parâmetros (relacionando dois valores de  $y^+$  estudados) com o grau de refinamento da malha.

Apresentam-se na Tabela 4.4 a forma como os valores de  $y^+$  da malha, na região do ponto de inflexão (PI) e o seu valor máximo verificado ao longo do domínio, se relacionam com a variação dos valores dos restantes parâmetros. É interessante observar como variam os resultados dos diversos parâmetros com o valor de  $y^+$ , sendo que valores elevados ( $>30$ ) implicam a resolução do escoamento próximo da parede através da aplicação de Leis de Parede, enquanto valores baixos de  $y^+$  permitem a resolução efetiva das equações de governo nessa mesma região.

Os resultados presentes na Tabela 4.4 encontram-se apresentados na forma gráfica na página 122 (capítulo Apêndices), o que permite uma melhor noção da evolução das diversas grandezas com o refinamento da malha. À exceção dos valores de  $\theta$  e de  $I(E)/I(S)$ , os resultados sugerem que, na maioria dos parâmetros, os valores obtidos estabilizam para malhas com  $h=0,30$  mm ou mais refinadas. Os resultados do parâmetro  $H$ , e os valores de  $y^+$ , representados nas Figuras 7.20 e 4.15, demonstram mesmo a validade da malha  $h=0,15$  mm de forma a ser empregue em estudos computacionais.



**Figura 4.14 – Valores de  $H$  em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente**



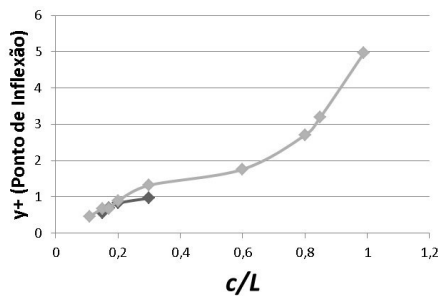
**Figura 4.15 – Valores máximos de  $y^+$  verificados no domínio computacional em função da espessura  $h$**

Os dados representados nas figuras seguintes são relativos à malha  $h=0,15$  mm para os diversos convergentes analisados. Apesar de não fazerem parte do estudo de independência de malha, são indicadoras do grau de refinamento das malhas utilizadas para os convergentes estudados e, conseqüentemente, da sua qualidade, constituindo uma forma de comparar as malhas dos diferentes convergentes entre si.

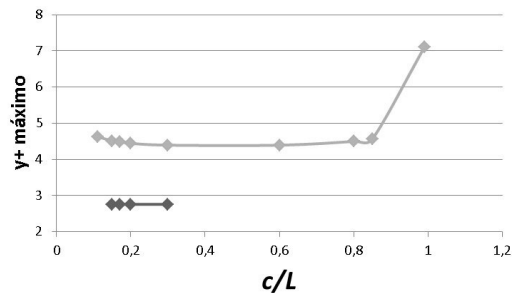
A Figura 4.16 apresenta o valor da distância  $y^+$  no ponto de inflexão do contorno de cada convergente estudado. O valor de  $y^+$  aumenta com o valor de  $c/L$  pois quanto mais próximo o PI estiver da seção de saída do convergente, menor a área da seção do escoamento, maior a sua velocidade, levando o valor de  $y^+$  a ser maior. Portanto, apesar de a densidade da malha ser idêntica para todos os casos estudados, devido a este facto a precisão dos resultados obtidos pode diminuir para a seção transversal que contem o ponto de inflexão e introduzir erros na comparação entre convergentes (na seção S6).

Na Figura 4.17 é apresentado o valor de  $y^+$  máximo verificado ao longo de toda a malha dos casos estudados, verificando-se que este se mantém praticamente inalterado para os diferentes convergentes estudados, facto compreensível pois a velocidade na secção de saída do

convergente será similar em todos os casos (zona que presumivelmente verifica maior valor de  $y^+$ ). O valor superior relativo ao convergente  $c/L=0,99$  poderá dever-se ao facto de a velocidade na secção de saída ser mais elevada para esse caso por o escoamento ser obrigado a aumentar em muito a sua velocidade, e por possivelmente não possuir apenas a componente horizontal de velocidades (ver 7.23).



**Figura 4.16 – Valor da distância  $y^+$  das malhas no ponto de inflexão dos contornos dos diversos convergentes estudados, para os rácios 4:1 e 9:1**



**Figura 4.17 – Valor máximo da distância  $y^+$  verificado ao longo da malha adjacente ao contorno dos diversos convergentes estudados, para os rácios 4:1 e 9:1**

O motivo pelo qual os valores de  $y^+$  se apresentarem menores para os convergentes com rácio de 4:1 deve-se ao facto de se ter definido inconvenientemente um caudal menor para esses convergentes, relativamente aos convergentes 9:1 – por se ter definido valor de velocidade para o escoamento à entrada do domínio computacional igual em ambos. Assim, o escoamento à saída dos convergentes 4:1 possui uma velocidade menor do que a verificada nos 9:1, levando a que o seu valor de  $y^+$  seja menor. Esta discrepância ocorre principalmente na parte final do convergente, onde a diferença de velocidades entre os convergentes é menor. No entanto, na zona inicial do comprimento do convergente a diferença é praticamente inexistente, visto ambos os formatos considerados possuírem semelhante velocidade de escoamento, sendo isso observado nos casos em que o valor de  $c/L$  é baixo.

A malha empregue nos estudos do presente trabalho é apresentada, a título de exemplo, na Figura 7.4, para o caso com  $c/L=0,17$ . As células adjacentes à superfície do contorno possuem uma espessura de 0,15 mm ( $h$ ).

## 4.2 Análise de critérios para a separação do escoamento

Através do *Post-processing* das simulações realizadas no FLUENT, através da observação dos *contours* de velocidade observou-se a ocorrência de uma bolha de recirculação na zona inicial dos convergentes caracterizados por valores de  $c/L$  até 0,17, no entanto, para convergentes com valores de  $c/L$  próximos de 1 não se verificou a existência de bolha de recirculação pelo mesmo método. A observação das linhas de corrente do escoamento não antecipam zonas de separação. As linhas de corrente não «descolam» da superfície do convergente pelo que o resultado sugere que não ocorra separação. Em todo o caso esta pode ocorrer, como evidenciam

as velocidades mais elevadas segundo a componente radial (eixo  $y$  da Figura 3.1), no sentido do interior do convergente.

Tendo como objetivo identificar a existência de separação no escoamento no interior do convergente através de um método, foram desenvolvidas métricas que permitam comparar os diferentes convergentes. No presente capítulo são calculados diversos parâmetros decorrentes da teoria da placa plana, assim como os coeficientes de pressão e de fricção ao longo da superfície dos convergentes. Os resultados deste subcapítulo baseiam-se em pontos do ábaco de Levin com ordenadas  $D_0/D$  iguais a 2 e a 3. Nesse sentido, o estudo aqui apresentado diz respeito a convergentes axissimétricos, de secção circular. O propósito não é estudar a saída do convergente retangular a ser usado no túnel aerodinâmico.

## 4.2.1 Critérios baseados em parâmetros da CL

Nesta seção é comparada entre os diversos formatos de convergentes o estudo dos vários parâmetros relativos à CL, sendo eles a espessura da camada limite ( $\delta$ ), espessura de deslocamento da camada limite ( $\delta^*$ ), espessura da quantidade de movimento ( $\theta$ ) e fator de forma do perfil ( $H$ ). Os valores dos dados obtidos nas diversas secções apresentados nos gráficos deste subcapítulo foram são aproximados através de *splines*, de modo a construir as linhas de tendência.

### 4.2.1.1 Estudo da espessura da camada limite ( $\delta$ )

Através do estudo dos perfis de velocidades em dez secções distintas dos convergentes, caracterizados por  $D_0/D$  igual a 3, obtiveram-se os valores para a espessura da CL para diferentes valores de  $c/L$ , apresentados na Tabela 7.1 da página 123.

Nas secções iniciais do convergente os valores de  $\delta$  sugerem que diminuem com o aumento do valor de  $c/L$  do convergente. Isto deve-se ao facto de em termos adimensionais (segundo a dimensão  $x/L$ ) o comprimento do convergente é mais reduzido, levando a que a CL possua de menos comprimento de conduta para se desenvolver e crescer. Os resultados de  $\delta$  mostram que esta grandeza não é a mais aconselhável para utilizar como critério de avaliação, devido a aparentarem alguma dispersão e a comparação entre valores ser pouco esclarecedora.

Com base nos valores de  $\delta$ , foi possível determinar os parâmetros relativos à CL apresentados de seguida. Apresenta-se a comparação dos seus resultados numéricos assim como as suas linhas de tendência nos gráficos seguintes, de modo a explicitar as diferenças nos valores das diferentes secções.

### 4.2.1.2 Estudo da espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ) e da espessura da quantidade de movimento ( $\theta$ )

Considerando que o formato do convergente é tanto melhor quanto menores os valores dos parâmetros  $\delta^*$  e  $\theta$  (como mencionado na secção 2.1.5.1), apresentados nos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19. Nesse sentido ambas as figuras sugerem ambos a mesma conclusão: os contornos dos convergentes apresentam uma melhoria contínua dos escoamentos produzidos com o crescimento dos valores de  $c/L$ , desde os valores mais baixos, até se alcançar o valor de

0,60, caso que apresenta os perfis de velocidades mais cheios. A partir do caso 0,60 os indicadores dos convergentes seguintes parecem aumentar com  $c/L$ , para valores de  $x/L$  superiores a zero. O convergente associado a  $c/L=0,60$  apresenta os valores mais baixos de  $\delta^*$  e  $\theta$  ao longo do comprimento do convergente, pelo que através do estudo destes dois parâmetros pode-se considerar como o melhor formato para o convergente.

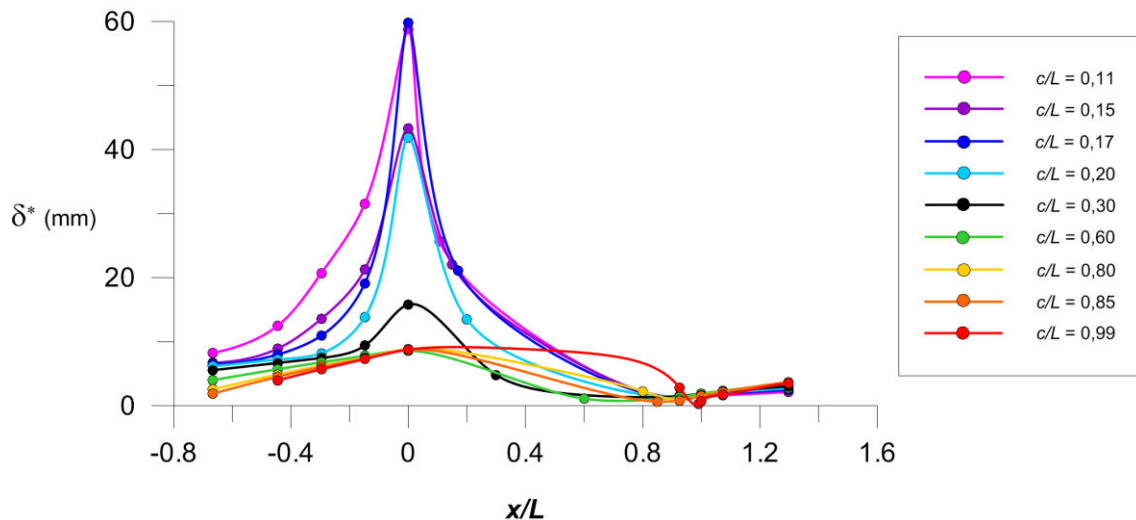


Figura 4.18 – Espessura de deslocamento dos convergentes com  $D_0/D=3$ , mostrando uma diminuição sucessiva com o aumento de  $c/L$

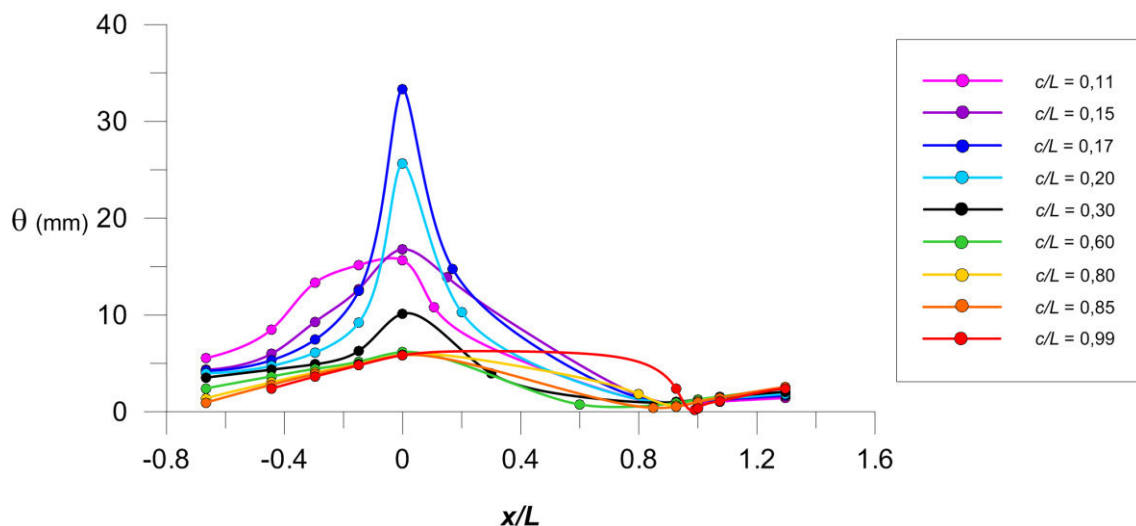


Figura 4.19 – Espessura de quantidade de movimento dos convergentes com  $D_0/D=3$

Tendo em conta que se pretende o convergente mais curto possível – preferência pelos valores mais baixos de  $c/L$  – a diferença entre as linhas relativas a  $c/L$  igual a 0,3 e 0,6 é pequena comparativamente com a verificada entre os casos com valores de  $c/L$  menores e 0,6. Portanto, o convergente referente a  $c/L=0,3$  é já muito bom, especialmente considerando o convergente relativo a 0,20 – que se aparenta bastante com as linhas dos casos que possuem recirculação na zona inicial do convergente, como será visto mais à frente.



As linhas dos contornos associados a valores de  $c/L$  superiores ou iguais a 0,60 assemelham-se mais entre si, diferindo de uma forma mais gradual. Verifica-se que a qualidade do escoamento de grosso modo decresce com o aumento de  $c/L$  – baseada nos parâmetros  $\delta^*$  e  $\theta$ . Salienta-se o facto de os valores relativos a  $c/L=0,99$  demonstrarem uma tendência diferente dos restantes contornos, indicador de que a qualidade do escoamento resultante se degrada. No entanto não é suficiente para ser possível declarar a existência de uma segunda zona interdita para valores de  $c/L$  mais elevados.

Como mencionado na secção 2.1.5.1, menores valores de  $\delta^*$  são indicadores de um perfil de velocidades mais cheio, o que por sua vez é indicadora de uma menor probabilidade do escoamento sofrer recirculações. Por esse motivo os convergentes com valores de  $c/L$  entre 0,30 e 0,60 são os que apresentam o escoamento com melhor qualidade. É também por essa razão, os valores de  $\delta^*$  são mais elevados junto à entrada dos convergentes, onde é mais provável que ocorra a recirculação nos convergentes mais curtos, que têm o PI do contorno próximo da entrada do convergente. Assim, o convergente que com  $c/L=0,3$  apresenta-se como sendo consideravelmente melhor do que o convergente de  $c/L=0,2$ .

Os dados recolhidos não verificam a relação  $\delta^*=\delta/3$  para a placa plana, apresentando antes, em média, a relação  $\delta^*=\delta/5$ . Isto não significa que a teoria da placa plana não é aplicável, mas antes mais uma prova de se tratar de um escoamento no interior de uma conduta, restringido em termos de caudal.

Quanto ao gráfico do parâmetro  $\theta$ , é de salientar que as linhas relativas aos convergentes  $c/L$  iguais a 0,11 e 0,15 demostram um «andamento» distinto dos demais convergentes, possuindo mesmo valores inferiores que os convergentes com valores de  $c/L$  iguais a 0,17 e 0,20 na zona da secção de entrada do convergente. Poderá indicar a existência de uma bolha de recirculação no início do convergente, o que explicaria que a energia dissipada pelo escoamento para a parede do convergente seria menor. Considerando o significado da grandeza  $\theta$ , como referido no capítulo 2.1.5.1 – traduz a porção de energia dissipada pelo escoamento para a superfície – os convergentes intermédios tornam a ser os que apresentam o melhor desempenho.

Os valores de  $\delta^*$  e  $\theta$  são maiores na região da secção de entrada do convergente, alcançando de grosso modo os seus valores mínimos na secção de saída. O maior valor máximo verificado para a espessura de deslocamento corresponde ao caso  $c/L$  igual a 0,17 sendo o seu valor de 59,8 mm, enquanto o menor valor máximo ocorre para a curva 0,99 sendo 0,32 mm, na zona do PI do contorno. A partir do valor  $c/L$  0,30 todas as curvas possuem valores máximos que se assemelham muito.

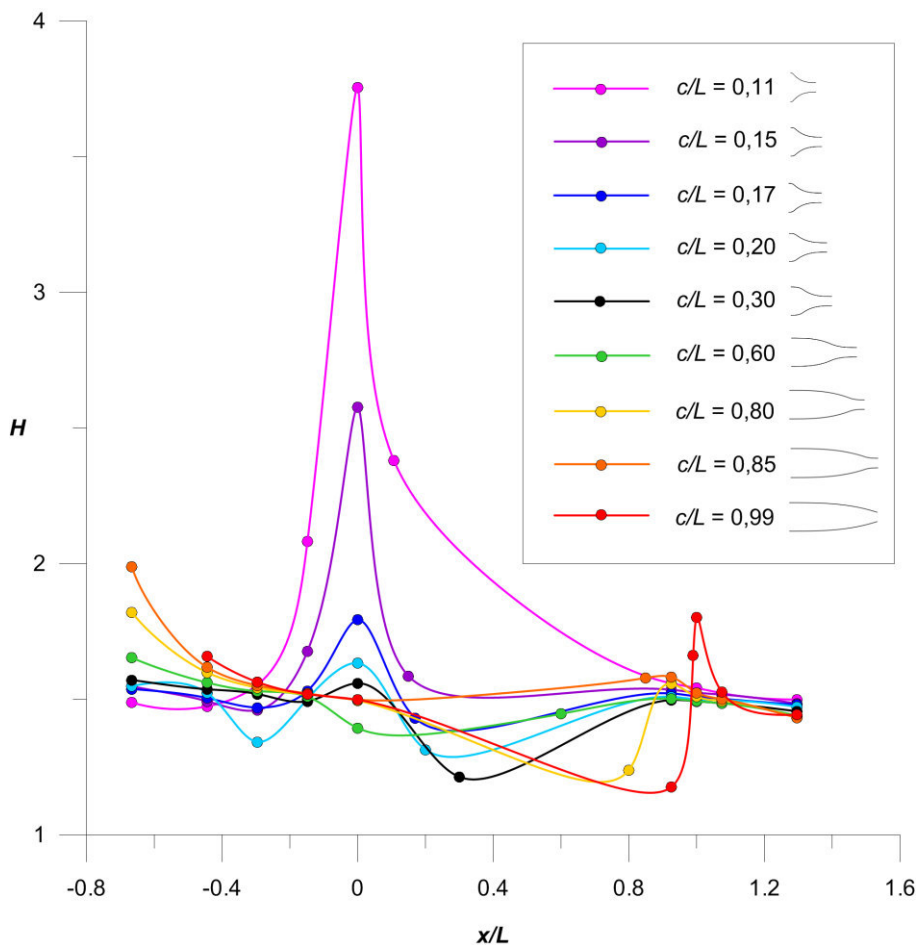
Quanto à espessura da quantidade de movimento, os valores máximos surgem também na secção de entrada, sendo o maior valor verificado também para o caso 0,17 com o valor de 33,4 mm. Os valores máximos vão diminuindo gradualmente até estabilizarem todos em torno do mesmo valor para as diversas curvas a partir de  $c/L=0,60$  onde  $\theta$  vale sensivelmente 6 mm. O valor mínimo pertence à curva 0,99 uma vez mais no PI, com o valor de 0,19 mm.

#### 4.2.1.3 Estudo do fator de forma do perfil ( $H$ )

Após a determinação de  $\delta^*$  e  $\theta$ , é calculado através da expressão da secção 2.1.5.1, o valor de  $H$  da secção em estudo. É conveniente relembrar que para escoamentos sobre a placa

plana, valores de  $H$  superiores a 1,8 são indicadores da ocorrência de separação de escoamento. Embora o nosso caso de estudo seja uma conduta, é um indicador importante.

Os dados sugerem, incontestavelmente, que a curva associada a  $c/L$  igual 0,11 esta associada à zona interdita que se procurava confirmar através dos resultados numéricos. É a curva que manifesta os valores de  $H$  mais elevados, a única que ultrapassa largamente o valor de  $H$  igual a 2 na secção de entrada do convergente assim como nas duas secções estudadas adjacentes – uma delas, relativa ao PI. O convergente  $c/L=0,15$  também apresenta um valor elevado na secção de entrada do convergente. Já nos restantes casos, não se volta a alcançar um patamar suficientemente elevado que sugira a existência de separação, o que demonstra que o convergente  $c/L=0,15$  representa com bastante rigor o limiar da zona interdita no ábaco.



**Figura 4.20 – Fator de forma do perfil dos convergentes com  $D_0/D=3$**

São os valores extremos de  $H$  na secção de entrada do convergente para os convergentes  $c/L$  mais pequenos – 0,11 e 0,15 – que sugerem que o escoamento desses dois casos apresenta inequivocamente recirculação nessa zona. O caso 0,17 possui um valor de 1,79 na secção de entrada, apesar de meramente indicativo, sustenta a afirmação de que o limite da zona interdita do ábaco foi representado com rigor no ábaco de Levin.

Pela análise deste parâmetro, tal como para os parâmetros estudados anteriormente, a qualidade do escoamento aumenta sucessivamente com o aumento do valor de  $c/L$ . É possível constatar que os convergentes com o melhor desempenho apresentam valores de  $c/L$  intermédios, sendo o que apresenta melhor qualidade de entre os estudos é o 0,60, com exceção no PI. A partir deste, os perfis de velocidades estudados perdem sucessivamente qualidade com o aumento de  $c/L$ , exceto o convergente 0,80 na secção do PI.

Embora não seja possível declarar apenas através do estudo do fator de forma que foi identificada uma nova zona interdita no ábaco, os dados sugerem que foi alcançado o seu limiar. Como se pode constatar pela curva  $c/L=0,99$  da Figura 4.20, é a única que demonstra um «salto» na secção de saída do convergente. Os valores de  $H$  nessa zona, secções correspondentes ao PI e a  $x/L$  igual a 1, são mais elevados do que todos os restantes convergentes para as coordenadas axiais homólogas.

Embora que nas curvas de  $c/L$  igual a 0,80 e 0,85 sejam registados valores elevados na primeira secção de medição na medição ( $x/L = -0,67$ ), este poderão nada ter a ver com a ocorrência de separação no escoamento. Pode dever-se antes à proximidade da região de medição com a entrada do domínio computacional, aumentando os erros dos resultados computacionais associados por se encontrarem demasiado influenciados pelas condições fronteira, ou mesmo pelo facto enunciado no subcapítulo anterior, que a CL não teve o comprimento de conduta suficiente para se desenvolver e crescer, afetando os valores do indicador  $H$ . Por estes motivos, esses dados não são considerados, além de que essa secção se encontra fora do convergente.

#### **4.2.1.4 Comparação entre convergentes com rácio 4:1 e 9:1 através de $H$**

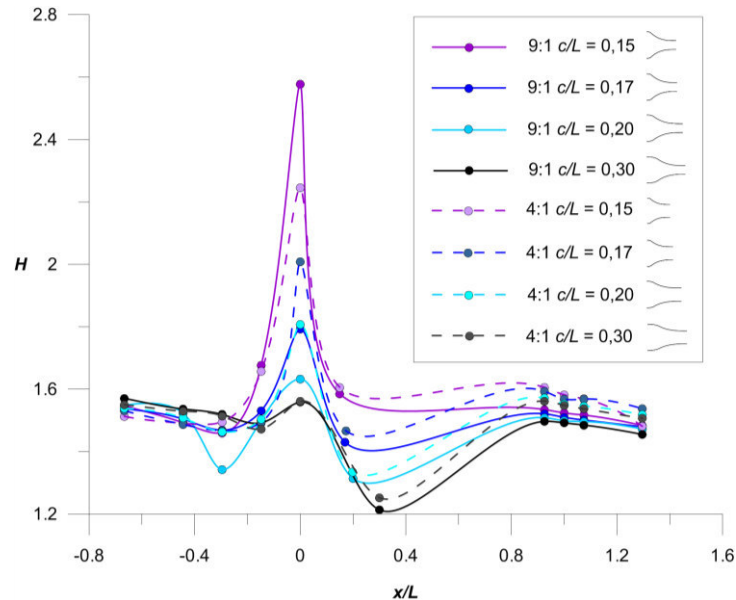
A comparação dos valores de  $H$  entre os resultados de convergentes com  $c/L$  correspondentes, dos diferentes rácios de áreas 4:1 e 9:1, é apresentada na Figura 4.21. De lembrar que esta comparação tem por base simulações a convergentes axissimétricos, com iguais caudais e diâmetros de entrada, de forma a serem comparáveis entre si no estudo do ábaco do estreitamento hidráulico.

Antes de mais os resultados sugerem que a relação entre os diversos convergentes de 4:1 (diferentes valores de  $c/L$ ) é igual à analisada anteriormente para os convergentes 9:1. Nos convergentes 4:1, o escoamento de  $c/L=0,11$  indica a tendência de apresentar separação (embora menos do que para o convergente 9:1) enquanto o caso  $c/L=0,30$  apresenta o escoamento com melhor qualidade, segundo o parâmetro  $H$ .

Comparando os contornos de rácios de áreas diferentes entre si, apesar da pequena diferença existente entre os dois tipos de convergentes – com a exceção do caso  $c/L=0,15$  em torno da secção de entrada do convergente – os valores de  $H$  verificados pelos convergentes 9:1 são sempre inferiores aos verificados pelos convergentes 4:1, pelo menos a partir da secção S3 ( $x/L = -0,296$ ).

Nesse sentido, os resultados sugerem que os convergentes com rácio de áreas de 9:1 apresentam um escoamento com melhor qualidade do que os convergentes com um rácio de áreas menor, e consequentemente, menor probabilidade de o seu escoamento possuir turbilhões e recirculações. De salientar que é reiterada a percepção de que a qualidade do escoamento melhorar sucessivamente entre os convergentes caracterizados pelos valores  $c/L$  entre 0,15 e

0,3. Assim, os convergentes associados ao valor 0,30 para a relação  $c/L$  consideram-se ser os que apresentam o melhor escoamento, sendo o que apresenta melhor qualidade em termos absolutos o rácio de áreas 9:1.



**Figura 4.21 – Comparação do parâmetro  $H$  entre convergentes com rácios de área 4:1 e 9:1**

Segundo os parâmetros da CL, o convergente com rácio de áreas de 9:1 e  $c/L=0,30$  deve ser a escolha para a geometria para o projeto do convergente do túnel aerodinâmico.

#### 4.2.2 Critérios baseados nos coeficientes de pressão e de atrito

De forma a retirar conclusões sobre quais as melhores geometrias de convergentes, foram analisados três parâmetros diferentes desde a secção de entrada do convergente e a secção de saída do domínio computacional: pressão estática adimensional ( $C_{pe}$ ), coeficiente de fricção na parede do convergente ( $C_f$ ) e fator de forma do perfil de velocidades ( $H$ ). Representa-se a pressão estática ao longo da parede sólida do convergente pelo coeficiente de pressão (traço contínuo) – apresentando-se a sua taxa de variação  $\left. \frac{dC_{pe}}{dx} \right|_w$  (tracejado fino) – sendo contraposta com a pressão estática verificada ao longo do eixo de simetria do convergente (tracejado) – pressão verificada ao longo do eixo de simetria do convergente ( $C_{pe}(\Phi)$ ).

No entanto os diferentes casos estudados, os gráficos da pressão estática sobre a parede sugerem que junto à parede do convergente o gradiente de pressão não é afinal favorável durante todo o comprimento do convergente. Os resultados indicam o surgimento de gradiente adverso nas regiões junto das secções de entrada (mais forte) e de saída (mais suave) do convergente. Quanto ao gradiente de pressão observado sobre a  $\Phi$ , este apresenta-se continuamente favorável ao longo de todo o comprimento do domínio estudado.

O caso da  $c/L=0,11$  (Figura 4.22) correspondente a um convergente associado à zona interdita do ábaco. É possível constatar que os valores máximos do gradiente de pressão adverso são mais elevados que nos restantes convergentes estudados, assim como para o valor do fator de forma na secção de entrada do convergente. Verifica-se ainda um desvio considerável entre a pressão estática na parede da ocorrida sobre a  $\Phi$  na parte inicial e na parte final dos convergentes. Pretende-se portanto que a diferença entre  $C_{p_e}$  e  $C_{p_e(\Phi)}$  seja mínima, assegurado desse modo o gradiente de pressão o mais favorável possível ao longo de todo o comprimento do convergente.

O caso  $c/L=0,15$  (Figura 4.23) corresponde ao limite da zona interdita do ábaco. Continua a existir uma diferença considerável entre a pressão estática na parede e a ocorrida na  $\Phi$  na parte inicial e final do convergente, assim como a correspondente manifestando-se no fator de forma a indicação de separação  $x/L=0$ .

No caso  $c/L=0,20$  (Figura 4.24) verifica-se que a pressão estática verificada na parede do convergente se aproxima ao valor lido sobre a  $\Phi$  do convergente em relação aos casos anteriores. O gradiente adverso máximo observado no fim do convergente é uma ordem de grandeza inferior aos casos apresentados anteriormente, de  $c/L=0,11$  e  $c/L=0,15$ , enquanto os valores do parâmetro  $H$  nunca ultrapassam o 1,7.

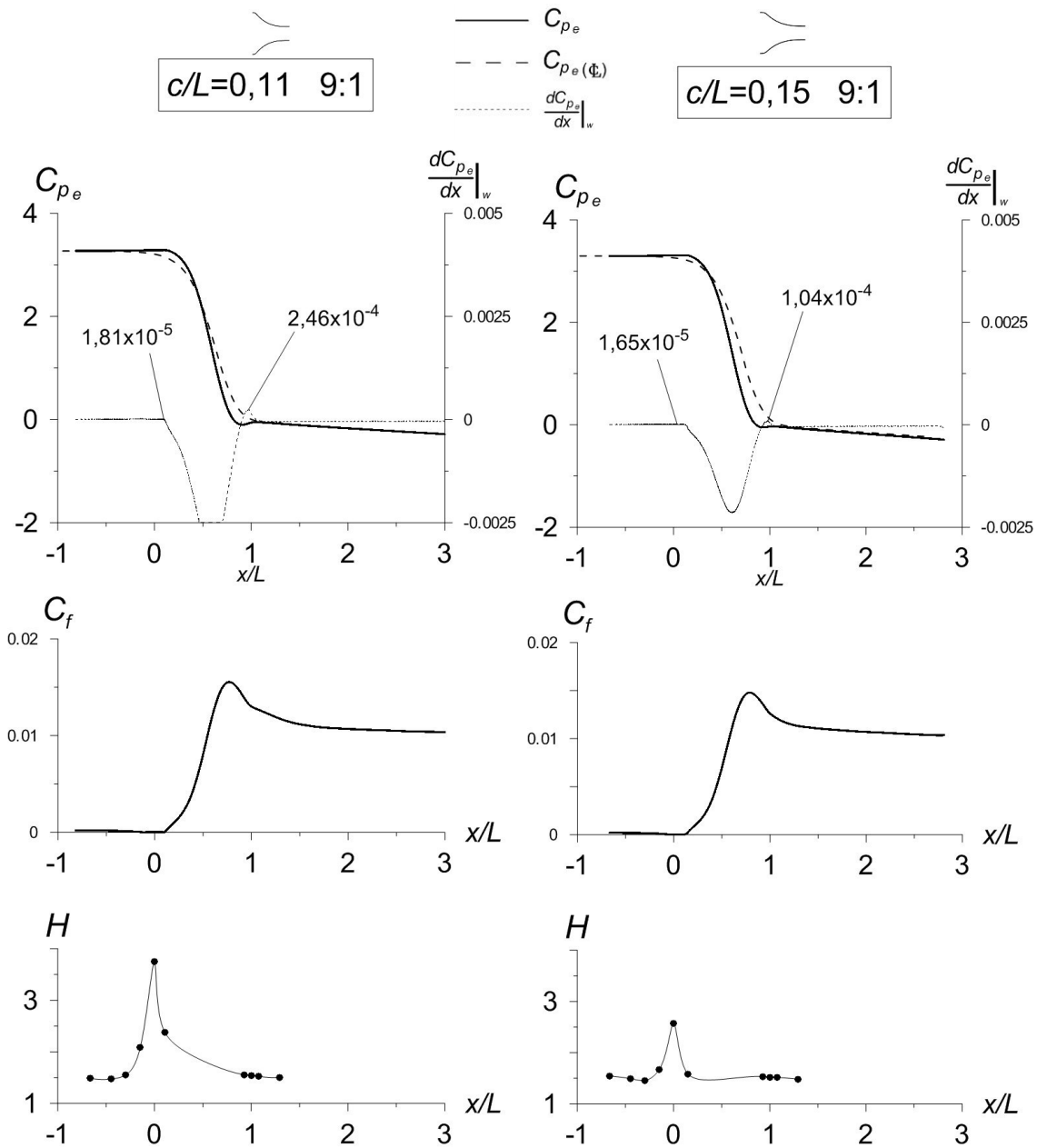
No caso  $c/L=0,30$  (Figura 4.25) a pressão estática na parede assemelha-se ainda mais à verificada sobre o eixo de simetria do convergente, pelo que diminuem os valores máximos para os gradientes de pressão adversos, assim como o valor máximo verificado para  $H$ .

A Figura 4.26, relativa ao caso  $c/L=0,60$ , é que mostra que ambos os valores de pressão estática ( $C_{p_e}$  e  $C_{p_e(\Phi)}$ ) se parecem assemelhar mais, resultando em valores mínimos para os gradientes de pressão adversos. Possui os valores mais baixos de  $H$  para o domínio correspondente ao convergente.

No caso correspondente à isolinha  $c/L=0,99$  (Figura 4.27), encontram-se indicadores de potencialmente existir separação do escoamento, ou seja, de uma possível segunda zona interdita. O gradiente de pressão junto da parede é bastante adverso no final do convergente, assim como o valor do fator  $H$ . Na mesma secção, o salto nos valores de  $C_f$  é indicador de uma anomalia, mas tendo em consideração que não se alcançou o valor de tensão de corte igual a zero na parede do convergente revela que não ocorreu separação – comparar com caso exposto na Figura 4.30 a).

**Tabela 4.5 – Comparação dos valores obtidos para o coeficiente de fricção: analiticamente e computacionalmente**

Diâmetro da Secção (mm)	$V$ (m/s)	$Re$ ( $\times 10^5$ )	$f$	$\tau_w$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$C_f$ (analítico)	$C_f$ (computacional)	Erro (%)
$D_0=1200$	2,050	1,63	0,0160	0,0103	$1,60 \times 10^{-4}$	$1,65 \times 10^{-4}$	3,03
$D = 400$	18,45	4,89	0,0125	0,652	0,0101	0,0103	1,94



**Figura 4.22 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,11$ . Relativo à zona interdita do ábaco, note-se o elevado valor de  $H$  em  $x/L=0$**

**Figura 4.23 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,15$ . Relativo ao limite da zona interdita do ábaco, note-se o elevado valor de  $H$  em  $x/L=0$**

Na Figura 4.28, relativa ao caso  $c/L=0,30$  com rácios de área de 4:1 e de 9:1 – a Figura 4.28 b) é uma repetição da já apresentada na Figura 4.25 – a comparação dos valores de  $\frac{dC_{p_e}}{dx}\bigg|_w$  sugerem que o gradiente adverso na secção de entrada do convergente é mais elevado para o convergente 4:1. Nesse sentido é menos provável ocorrer separação no escoamento para convergentes com rácio de áreas de 9:1. Mostra-se também que o parâmetro  $H$  não é o indicador mais esclarecedor para comparar os convergentes de diferentes rácios de áreas.

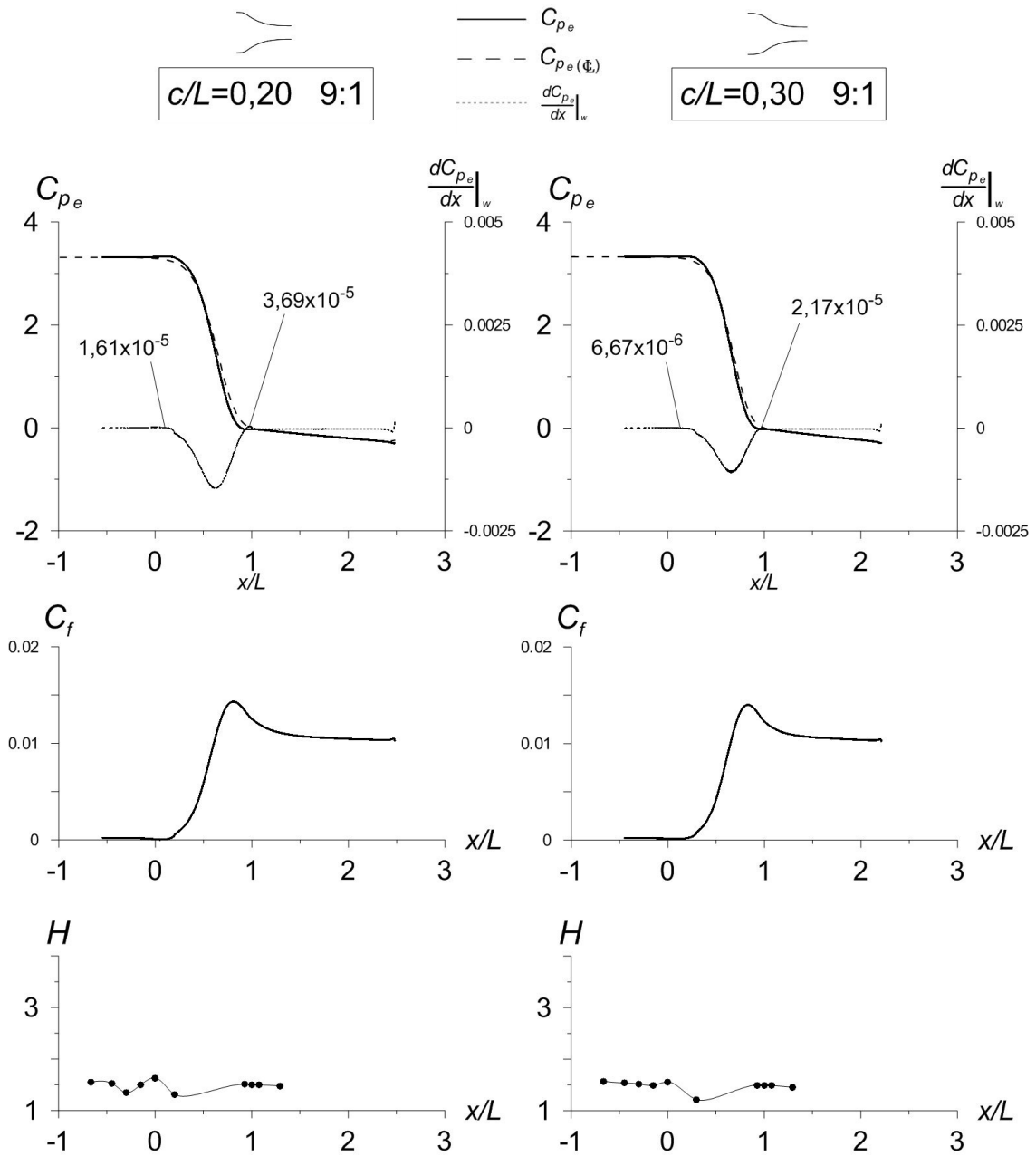
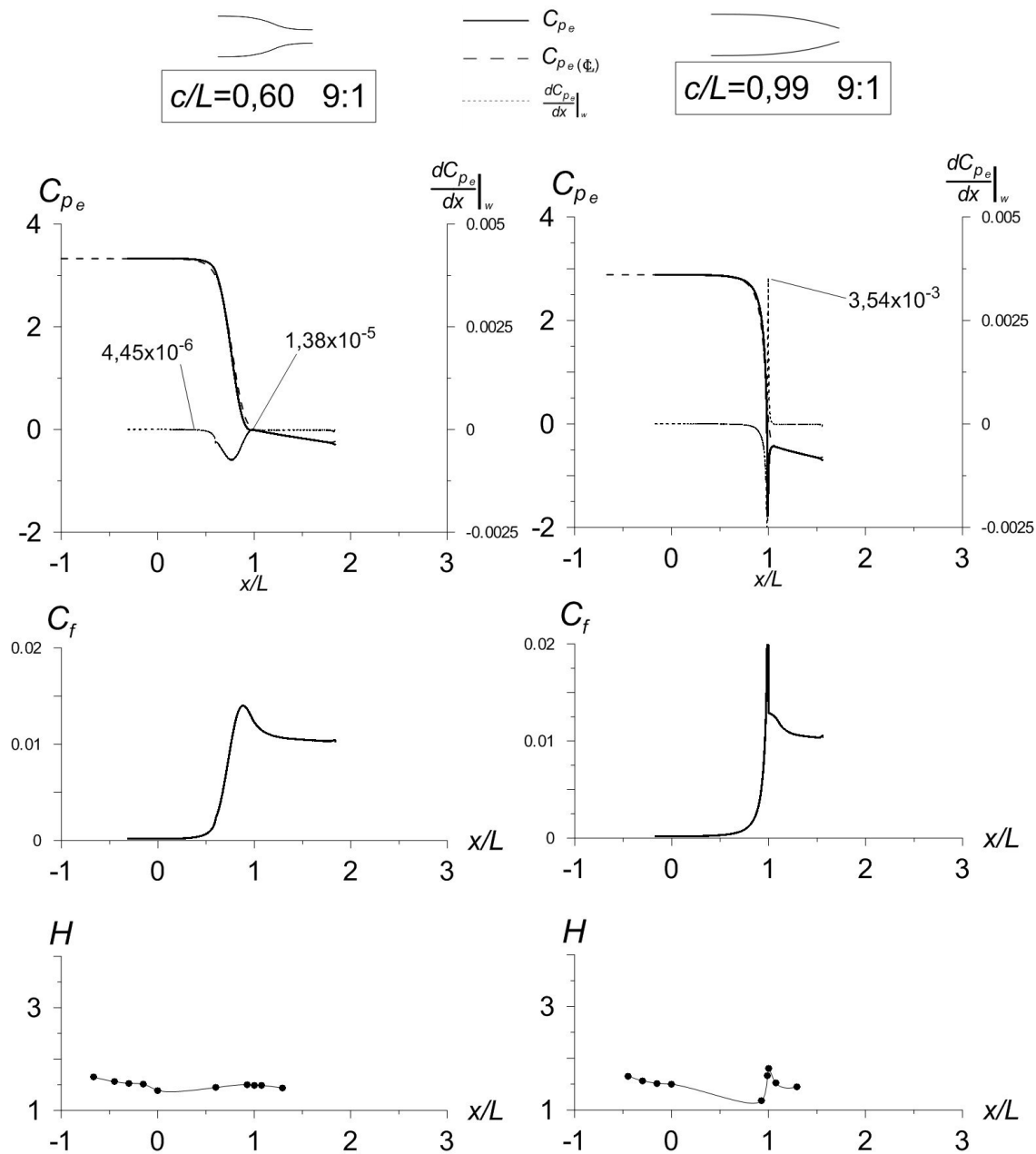


Figura 4.24 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,20$ . Note-se que a pressão estática na parede do convergente se aproxima da verificada na  $\Phi$ .

Figura 4.25 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,30$ . O  $C_{p_e}$  na parede assemelha-se muito a  $C_{p_e}(\Phi_e)$  pelo que diminuem os valores máximos dos gradientes de pressão adversos.

De modo a verificar se os valores computacionalmente obtidos para o coeficiente de fricção estão corretos, foram comparados com os valores obtidos analiticamente. O seu cálculo é descrito na secção 3.3.2.2. O caso utilizado para a comparação entre os resultados analíticos com os valores computacionais foi o caso com rácio de áreas 9:1 e  $c/L=0,30$ . Os resultados dos cálculos através do processo analítico bem como a comparação dos resultados pela forma analítica e a computacional são apresentados na Tabela 4.5.



**Figura 4.26 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,60$ . Caso em que os valores da pressão estática na parede do convergente e no eixo de simetria se parecem assemelhar mais**

**Figura 4.27 – Critérios de análise no convergente 9:1,  $c/L=0,99$ . Note-se nos elevados valores de  $\frac{dC_{p_e}}{dx}|_w$ ,  $C_f$  e  $H$  no final do convergente. Possibilidade de separação**

Considerando os valores de  $C_f$  para 3 algarismos significativos, a diferença entre os valores obtidos computacionalmente e os calculados analiticamente (valores esperáveis de encontrar em condutas com os diâmetros iguais ao caso estudado) não ultrapassa os 3,0%. Deste modo comprova-se que os resultados obtidos computacionalmente encontram-se dentro dos valores esperados.



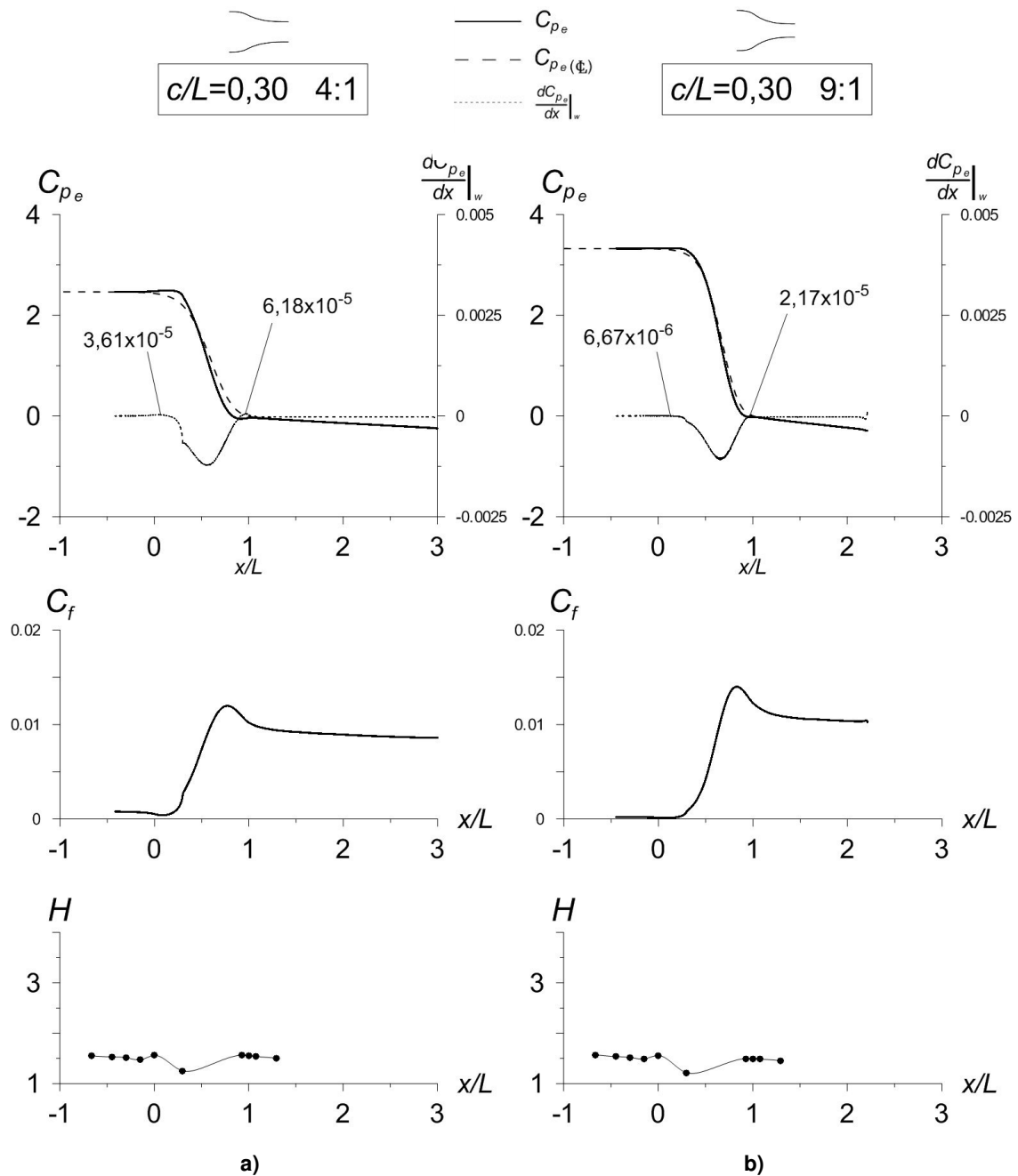


Figura 4.28 – Critérios de análise nos convergentes: a) 4:1,  $c/L=0,30$ ; b) 9:1,  $c/L=0,30$ . Note-se no gradiente adverso mais elevado no caso 4:1 do que no 9:1 à entrada do convergente.

#### 4.2.2.1 Interpretação dos resultados

##### 4.2.2.1.1 Fenomenologia do escoamento

Ao observar os diversos casos e os fenómenos que ocorrem, verifica-se que o valor da tensão de corte aumenta com o estreitar do convergente. Este facto sugere dever-se à aceleração do escoamento. As linhas de corrente aproximam-se entre si, levando a que o perfil de velocidades se torne mais cheio. Neste processo as linha de corrente são comprimidas contra as paredes do convergente: o mesmo ocorre com a CL, facto pelo qual diminuem os valores de  $\delta$ .

Consequentemente junto à saída do convergente, as tensões de corte junto à parede são máximas devido à existência de um perfil de velocidades muito cheio, bastante energético.

A pressão estática na parede chega mesmo a aumentar na secção de saída do convergente, o que indica a existência de um gradiente adverso, dependendo do valor característico  $c/L$  ser mais ou menos elevado. A existência de um gradiente de pressão adverso muito elevado pode significar a ocorrência de separação no escoamento e desprendimento de vórtices, sendo imperativo identificar os casos em que este fenómeno indesejável ocorre.

Após a variação dos valores de  $C_{pe}$  e de  $C_f$  na secção de saída do convergente (chegando a variação a ser abrupta no caso  $c/L=0,99$  retratado na Figura 4.27), verifica-se uma evolução após a secção de saída do convergente em que ambos os seus valores diminuem ligeiramente.

A pressão decai de forma constante, devido à perda de carga ao longo do restante domínio (computacional), como se de uma conduta real se tratasse. A tensão de corte decresce ligeiramente devido ao desenvolvimento do perfil de velocidades, desde o perfil bastante energético até ao perfil tampão, turbulento totalmente desenvolvido, por ação das forças viscosas resultantes da influência das paredes do domínio computacional. O valor da tensão diminui assintoticamente enquanto o perfil de velocidades se desenvolve.

Através da análise da tensão de corte ao longo da parede sólida do convergente, é possível observar que o domínio computacional não é suficientemente comprido após a secção de saída do convergente de modo a permitir que o perfil de velocidade se desenvolva completamente. É possível afirmar que o domínio computacional não é suficientemente comprido após a secção de saída do convergente de modo a permitir que o perfil de velocidade se desenvolva completamente. O perfil não se desenvolve totalmente visto que a tensão de corte adimensional não alcança nunca um valor constante, como é possível observar pela evolução de  $C_f$  ao longo do eixo  $x$ .

Os resultados parecem indicar que os convergentes cuja pressão estática na parede do contorno ( $C_{pe}$ ) se afasta mais da verificada sobre o eixo do convergente ( $C_{pe(\Phi)}$ ), revelam ser mais propícios para a ocorrência de gradientes adversos elevados e assim mais provável que ocorram recirculações.

**Tabela 4.6 – Valores dos máximos do gradiente adverso de pressão, verificados próximo da secção de entrada e de saída do convergente.**

$D_0/D$	$c/L$		0,11	0,15	0,17	0,20	0,30	0,60	0,85	0,99
3	Máximo $\frac{dC_{pe}}{dx} \Big _w$ ( $\times 10^{-5}$ )	Entrada	1,81	1,65	1,80	1,61	0,667	0,455		
		Saída	24,6	10,4	6,93	3,69	2,17	1,38	5,01	354
2	Máximo $\frac{dC_{pe}}{dx} \Big _w$ ( $\times 10^{-5}$ )	Entrada		6,21	6,29	6,74	3,61			
		Saída		30,6	18,0	11,3	6,18			

De forma genérica a distribuição do coeficiente de pressão estática ( $C_{pe}$ ) ao longo da superfície do convergente demonstra numa primeira fase uma redução muito suave do seu valor, devido à pequena perda de carga numa conduta de grande diâmetro. Aquando da secção de entrada do convergente ocorre um ligeiro aumento de pressão, especialmente em convergentes caracterizados por valores de  $c/L$  baixos, como é possível constatar pelos dados da Tabela 4.6. Este facto traduz a propensão a surgir separação no escoamento logo no início do convergente, zona onde a velocidade do escoamento é mais baixa.

Segue-se uma redução elevada de  $C_{pe}$  relacionada com a redução da área de secção do convergente, encontrando-se a sua taxa de variação associada ao valor de  $c/L$  do convergente. Enquanto o gradiente de pressão sobre o eixo de simetria de convergente é sempre constante, junto da secção de saída a pressão estática na parede volta a aumentar. Isto indica a existência de um gradiente adverso junto da parede e a possibilidade de ocorrerem separações, conforme uma vez mais os valores de  $c/L$ .

#### 4.2.2.1.2 Comparação dos rácios de áreas 4:1 e 9:1

É possível verificar que, para todos os valores de  $c/L$  estudados, os valores do gradiente adverso de pressão são sempre superiores para os casos que apresentem uma razão de áreas de 4:1 em comparação aos casos 9:1 (Tabela 4.6 e Figura 4.29), independentemente de se tratar da região próxima da secção de entrada ou de saída.

Reitera-se assim o que as conclusões obtidas anteriormente, relativas aos critérios baseados em parâmetros da CL: os convergentes com rácio de 9:1 apresentam-se como a melhor opção para a construção do convergente do túnel aerodinâmico.

#### 4.2.2.1.3 Seleção do contorno

Um critério de comparação entre os diversos convergentes é a análise dos valores máximos dos gradientes adversos de pressão que ocorrem junto às secções de entrada e de saída. A Tabela 4.6 apresenta os gradientes adversos de pressão máximos relativos aos vários convergentes estudados. Tanto os dados da tabela, como os gráficos apresentados entre as páginas 78 e 81 que retratam os seus valores, parecem sugerir que o convergente  $c/L=0,60$  apresenta o escoamento com melhor qualidade, em termos absolutos. No entanto consiste num convergente mais longo que os associados a valores de  $c/L$  inferiores, apresentando indicadores nas mesmas ordens de grandeza.

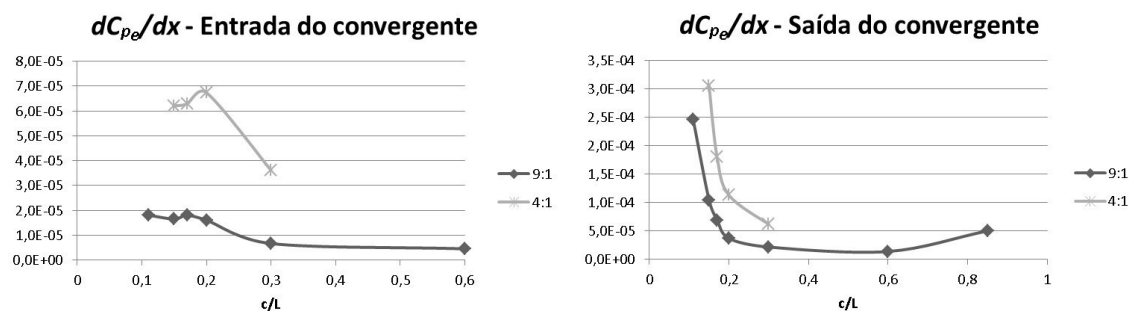
Através da avaliação da qualidade do escoamento para os convergentes mais curtos, baseada nos valores dos gradientes de pressão e no estudo do fator de forma  $H$  (Figura 4.20), conclui-se que os contornos associados aos valores de  $c/L=0,11$  e  $0,15$  apresentam recirculação no seu escoamento, encontrando-se corretamente assinalados como pertencentes à zona interdita do ábaco. Estes convergentes mais curtos demonstram a existência de um ponto anguloso entre a secção de entrada e o PI. Como se pode observar pela Figura 4.29, o contorno relativo a  $c/L=0,17$  pode ainda apresentar separação no seu escoamento, principalmente pelo valor do gradiente de pressão à entrada deste ser tão elevado como para os casos  $c/L$  mais baixo. Esta possibilidade também é sugerida pela análise «*Post-processing*», segundo os «*vectors*» e os «*contours*», que indicam o sentido do escoamento e o valor da velocidade axial do escoamento. Assim, seria prudente considera-lo como fazendo parte da real zona limítrofe da zona interdita.

Constata-se que o estudo do  $C_f$  não constitui método mais robusto para detetar a separação no escoamento para os casos de  $c/L$  baixos. Isto deve-se ao facto de os seus valores na secção inicial em qualquer dos convergentes se aproximam muito de zero, não se tornando distinguíveis os casos que apresentam bolha de recirculação dos que não.

Atendendo à preferência por convergentes de menor comprimento, e atendendo desta vez aos valores de  $C_{pe}$  e  $C_f$ , os convergentes caracterizados pelas isolinhas do ábaco do estreitamento hidráulico referentes a  $c/L$  igual a 0,20 e 0,30 são boas possibilidades de escolha para o projeto do convergente. Entre estes dois, a preferência seria para o convergente  $c/L=0,30$  principalmente ao facto de os seus gradientes de pressão junto à parede do convergente serem inferiores e assim possuir um escoamento mais uniforme: o gradiente máximo verificado na primeira metade do contorno apresenta uma ordem de grandeza inferior ao verificado pelo convergente 0,20.

Acrescentando-se o facto dos convergentes com valores de  $c/L$  de 0,20 e 0,30 representarem convergentes consideravelmente mais curtos do que o verificado para o caso 0,60, estes podem ser considerados mais interessantes. Neste sentido a escolha do convergente a construir deverá encontrar-se nesse intervalo. Ainda assim os convergentes relativos a  $c/L$  igual a 0,20 e a 0,30 apresentam valores semelhantes entre si para os diferentes indicadores.

No entanto, apesar de o comportamento do escoamento entre os tipos de contornos 0,20 e 0,30 serem de grosso modo semelhantes, verifica-se uma ligeira vantagem para este último. Para o rácio de áreas de 9:1, o convergente associado a 0,20 apresentar um valor para o fator  $H$  maior na secção de entrada do convergente do que o contorno associado a 0,30: o seu valor é aproximadamente 1,63 face aos 1,56, respetivamente. Apesar de nenhum dos dois casos ser suficiente para a ocorrência da separação do escoamento, indica que é mais provável que esta ocorra no primeiro caso, visto o seu escoamento ser menos energético na secção de entrada do convergente.



**Figura 4.29 – Valores máximos do gradiente adverso de pressão observados para os convergentes de rácios de áreas 4:1 e 9:1.**

De facto a grande diferença entre os dois modelos de contorno reside na região entre a entrada do convergente e a do ponto de inflexão: ou seja na metade do convergente que é definida pelo primeiro polinómio. A corroborar esta análise está o valor do gradiente adverso pressão na região de entrada, onde o 0,20 é superior a 0,30 em uma ordem de grandeza. Em suma, o convergente com valor de  $c/L$  de 0,30 é, dos dois casos, o qual a pressão estática na parede ( $C_{pe}$ )

mais se aproxima da pressão estática verificada no eixo de simetria ( $C_{pe(\Phi)}$ ), antevendo-se este como o capaz de produzir um escoamento o mais uniforme de entre os dois.

Também pela observação do gradiente de pressão  $\left. \frac{dc_{pe}}{dx} \right|_w$  é possível ter uma indicação da existência de recirculação no início dos convergentes. Pode-se constatar que os convergentes com  $c/L$  inferior a 0,20, o valor do gradiente adverso de pressão é uma ordem de grandeza superior ao verificado para os casos que se considera que o escoamento possui melhor qualidade ( $c/L=0,30$  e  $0,60$ ).

Quanto à determinação dos casos que apresentam separação de escoamento para valores baixos de  $x/L$ , observando Concluindo, o melhor valor de  $c/L$  a ser utilizado no túnel aerodinâmico a ser construído encontra-se no intervalo de valores de 0,20 a 0,30, com valores de  $c/L$  preferencialmente mais próximos possíveis deste último.

O intervalo apresentado tem o propósito de não ser demasiado restritivo, de modo a não constranger os estudos subseqüentes e mais aprofundados de aerodinâmica, assim com o projeto de construção mecânica. Este facto está de acordo com o valor que seria de esperar, de acordo com as indicações de Levin que são dadas pelo exemplo de aplicação apresentado no próprio ábaco.

#### 4.2.2.1.4 Análise de valores de $c/L$ elevados

É possível identificar evidências da existência de uma bolha de recirculação através da observação apenas da pressão estática na parede. Isto porque para a recirculação ocorrer o escoamento tem de inverter o seu sentido, sendo necessário abrandar e dessa forma a sua pressão estática aumenta. Assim, através da comparação dos gráficos da pressão estática na parede entre convergentes com rácios de área de 9:1 e de 4:1, é possível identificar uma maior tendência de uma recirculação ocorrer para o segundo caso na parte inicial do convergente. Essa possibilidade dever-se-á à existência de um gradiente de pressão favorável menos intenso.

Através da análise dos dados relativos ao gradiente de pressão adverso no final do convergente verifica-se que o valor associado ao caso de  $c/L=0,99$  tem duas ordens de grandeza superiores do que o verificado para os casos que o antecedem em termos de comprimento de convergente. Este resultado sugere que muito provavelmente este convergente se encontra numa segunda zona interdita ou muito próximo dela, desta vez para valores muito elevados de  $L/D_0$  e de  $c/L$ . A região que nos referimos fica situada para além do domínio representado no ábaco do estreitamento hidráulico.

O valor do gradiente de pressão adverso verificado para o caso  $c/L=0,85$  encontra-se na ordem de grandeza dos valores verificados para os casos onde o escoamento é «bem comportado», pelo que presumivelmente não ocorrem ainda recirculações junto da sua secção de saída. No entanto o estudo apenas através deste parâmetro não permite afirmá-lo com segurança, pois os valores verificados para os casos à esquerda do ábaco em que ocorre recirculação ( $c/L$  igual a 0,11 e a 0,15) chegam a ser inferiores. No entanto é uma comparação meramente indicativa visto que não são de todo comparáveis, pois esses valores podem ser um reflexo da recirculação que ocorre no início do convergente em condições de pressão distintas.

Pode-se constatar que o escoamento acelera durante todo o comprimento do convergente, possivelmente abrandando na região de saída do convergente (existe aumento da pressão estática), resultando num suposto afastamento das linhas de corrente entre si. Esta região do convergente comportar-se-ia como um difusor. Estes são indicadores da ocorrência de uma *vena contracta*, em que as linhas de corrente afastar-se-iam da parede para logo de seguida se aproximarem um pouco (como indicado no capítulo 2.1.5.3). Nesse caso, após o aumento de pressão ocorreria uma diminuição da mesma – indicadora do estrangulamento da área útil de passagem causada pelo fenómeno e apenas posteriormente se verificaria a diminuição contínua na pressão, com declive constante, devida unicamente à perda de carga. Quanto à tensão de corte, verificar-se-ia a ocorrência de dois picos: o primeiro pela formação do perfil de velocidades cheio, e um segundo que indicaria uma aproximação das linhas de corrente à parede do contorno (aquando da diminuição da pressão). No entanto não se verifica esse comportamento nos gráficos de  $C_f$ .

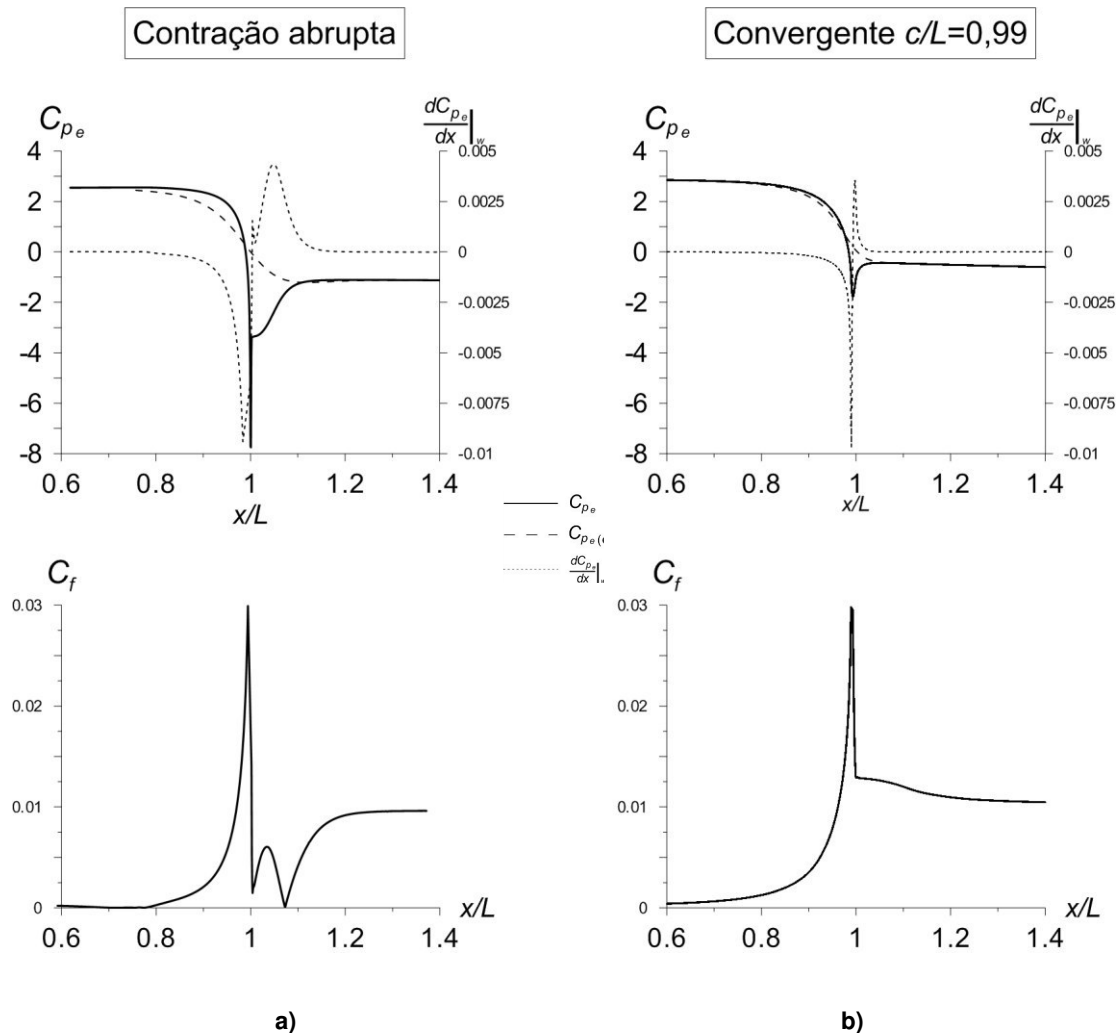
Uma explicação provável, aquando da formação do perfil de velocidades com um gradiente de velocidades elevado junto da superfície do convergente, poderá dever-se ao facto de as linhas de corrente se aproximarem em demasia da parede que após serem de tal forma comprimidas irão reverter o processo em excesso: zona onde se verifica o ligeiro aumento de pressão no final do convergente. As linhas de corrente, comprimidas contra as paredes, irão, deste modo, afastar-se até atingirem o equilíbrio, levando o escoamento a desacelerar ligeiramente após a secção de saída do convergente – a pressão aumenta enquanto a tensão de corte diminui. Isto significaria que o fluido na secção de saída se comportaria de forma ligeiramente compressível, o que é possível visto ser um gás pelo que a sua massa específica é muito variável, aumentando quase proporcionalmente com a pressão (White, 2011). Este efeito é mais proeminente quanto mais elevado o valor de  $c/L$  relativo ao ábaco de Levin. No entanto os resultados não poderiam captar esta variação visto que na modelação do fluido na ferramenta numérica se utilizou  $\rho$  constante.

São apresentadas na página 124 as linhas de corrente na secção de saída de uma contração abrupta em rampa (com um ponto anguloso) e na saída do convergente  $c/L=0,99$ , permitindo comparar o comportamento das linhas de corrente em ambos os casos. A Figura 7.22 apresenta o efeito de uma *vena contracta*, mostrando que na secção de maior estreitamento para a passagem do fluido as linhas de corrente se aproximam ligeiramente, afastando-se ligeiramente após o fim do estrangulamento devido à bolha de recirculação. A Figura 7.23, relativa ao convergente  $c/L=0,99$ , demonstra que não só as linhas de corrente não «descolam» da sua superfície, assim como não existe bolha de recirculação.

Assim de modo a explicar o sucedido é necessário estudar mais detalhadamente o escoamento do convergente associado a  $c/L=0,99$ . A Figura 4.30 apresenta os gráficos de  $C_{pe}$  e  $C_f$  ampliados para os casos da contração abrupta e do convergente  $c/L=0,99$  referidos anteriormente. O estudo dos coeficientes ao longo das suas superfícies permite visualizar os sinais relativos à existência de uma bolha de recirculação na Figura 4.30 a), relativa à contração abrupta de uma conduta. Como é possível observar, para o caso  $c/L=0,99$  (Figura 4.30 b) não se verificam dois mínimos distintos no gráfico do coeficiente  $C_f$ .

Através da interpretação de  $C_f$  na Figura 4.30 a) é possível entender qual «assinatura» de uma bolha de recirculação à saída da redução de diâmetro. Esta está compreendida entre os dois mínimos representados, sendo que o primeiro se refere à separação do escoamento da

parede – com o aparecimento da bolha a tensão de corte na parede diminui – enquanto o segundo é relativo ao ponto de estagnação que assinala o fim da bolha – o valor de  $\tau_w = 0$  é indicador da existência de separação, como mencionado na secção 2.1.5.2.



**Figura 4.30 – Comparação dos coeficientes de pressão e de fricção entre (a) uma contração abrupta com um ponto anguloso e o (b) convergente  $c/L=0,99$ , mostrando a existência de bolha de recirculação para o primeiro caso.**

Pode-se observar que não existe bolha de recirculação no caso  $c/L=0,99$ . O escoamento está na iminência de se separar, o que para velocidade de escoamento maiores provavelmente poderá ocorrer. Pode-se concluir que se está no limiar de existir separação, logo os resultados sugerem que a existência do segundo ramo dos polinómios de 3.º grau que descreve o contorno do convergente, por mais pequeno que seja, impede a existência de um ponto anguloso e assim de ocorrer separação.

Foram ampliados os resultados em torno da secção de saída da redução de secção da conduta sem apresentar os valores de  $x/L$  próximos de zero, a região relativa à bolha de recircu-

lação inicial, pois os resultados relativos à pressão e à tensão de corte nessa zona não apresentam nenhuma flutuação assinalável que indique a sua presença. Considerou-se que estes parâmetros não são os mais robustos para detetar a presença de uma bolha de recirculação na entrada do convergente, ao contrário do que acontece com o fator de forma  $H$ .

De facto, apesar de se verificar um aumento da pressão estática junto da parede do convergente na secção de saída do convergente, o efeito não é verificado sobre a  $\Phi$ , o que significa que o escoamento não abranda. Este efeito é unicamente devido ao aparecimento de gradiente adverso, que é por sinal mais pequeno do que o verificado no caso em que dá origem à separação do escoamento. Significa que o gradiente de pressão foi adverso no convergente de  $c/L=0,99$ , mas não o suficiente pois não ocorre separação do escoamento ao logo do seu domínio.

### 4.3 Efeitos do rácio de áreas

Apesar de a literatura privilegiar os convergentes com o rácio de áreas entre os 6:1 e os 10:1, como descrito na secção 2.1.3.7.2, decidiu-se averiguar se os resultados numéricos corroboram a escolha desses valores. Apesar da comparação realizada dos convergentes com rácios de áreas diferentes entre as Figuras 4.28 a) e b), para  $c/L=0,3$  segundo os valores de  $C_p$ ,  $C_f$  e  $H$ , o estudo para averiguar o melhor rácio de áreas do convergente a implementar no túnel aerodinâmico será aprofundado nesta secção. Nesse sentido a avaliação terá por base a variação da perda de carga e da intensidade turbulenta entre as secções de entrada e de saída dos convergentes estudados.

**Tabela 4.7 – Espessura da camada limite para convergentes  $D_0/D=3$**

$c/L$	$\delta (x/L)$ [mm]									
	-0,667	-0,444	-0,296	-0,148	0	$c/L$	0,926	1	1,07	1,30
0,11	62,8	65,9	76,8	68,5	86,0	57,9	11,0	18,5	20,7	23,8
0,15	53,4	61,8	78,3	65,6	78,6	103	12,4	15,7	16,3	22,0
0,17	56,5	57,1	65,5	75,6	161	157	12,6	25,3	35,8	22,1
0,20	46,4	55,6	68,6	64,2	152	110	12,3	24,0	19,1	23,9
0,30	39,5	55,6	60,7	58,4	61,7	97,7	14,3	42,0	23,1	27,3
0,60	31,5	51,0	59,1	67,8	80,9	33,9	12,4	18,9	21,1	32,8
0,80	19,3	40,0	56,5	56,2	72,0	72,8	10,2	23,7	17,9	33,8
0,85	31,5	40,3	64,5	53,9	62,7	11,9	8,98	21,3	22,6	32,8
0,99	-	31,1	48,8	62,8	65,7	3,80	24,2	7,43	22,2	31,3

Foi necessário estudar geometrias de convergentes de rácios de áreas de 4:1 e 9:1, equiparáveis e relação a  $c/L$ . De forma a ser possível comparar diretamente os valores de  $I_{turb}$  entre convergentes de diferentes rácios de áreas, consideraram-se as secções de entrada como sendo de 1200 mm de diâmetro. Desse modo a razão da intensidade turbulenta entre a secção de saída e de entrada são comparáveis em todos os casos. Esta escolha implica que a malha dos convergentes com menor rácio de áreas sejam compostas por mais elementos – visto o diâmetro da



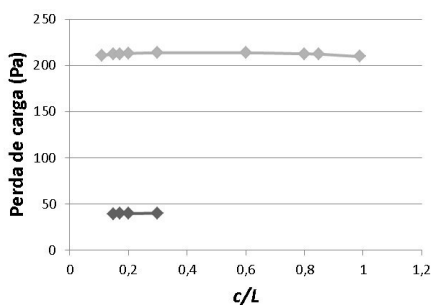
seção de saída ser de 600 mm, em vez dos 400 mm para o rácio de áreas de 9:1. Restringe-se assim, devido ao limite de número de elementos, a comparação entre os convergente 4:1 e os 9:1 a malhas de discretização em que a espessura das células adjacentes à parede do convergente  $h$  seja de 0,15 mm.

Os valores numéricos apresentados nos gráficos das figuras deste subcapítulo são descritos na Tabela 7.2 dos Apêndices, página 123.

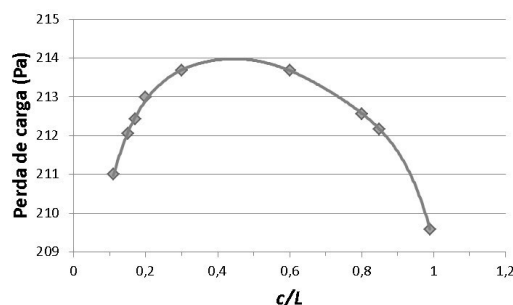
### 4.3.1 Perda de carga

A perda de carga é uma forma de quantificar a quantidade de energia perdida no escoamento, dissipada na forma de calor. Pretende-se um contorno que introduza as menores perdas possíveis, de modo a dissipar a menor quantidade de energia do escoamento, por forma a aproveitar o mais eficientemente o trabalho realizado pelo ventilador, de modo a ser possível alcançar a maior velocidade possível nos estudos efetuados. Assim, é de todo o interesse comparar a perda de carga verificada para diferentes contornos.

A perda de carga foi calculada considerando a diferença de pressão entre as pressões médias verificadas entre as seções S5 e S8 de leitura dos convergentes – seção de entrada e de saída do convergente, respetivamente.



**Figura 4.31 – Perda de carga verificada nos convergentes com rácios de área de 4:1 e de 9:1, segundo diferentes valores de  $c/L$**



**Figura 4.32 – Perda de carga verificada no convergente com rácio de áreas 9:1, segundo diferentes valores de  $c/L$**

A Figura 4.31 apresenta a comparação da perda de carga entre convergentes com rácios de áreas diferentes. Constata-se que os convergentes que apresentam um rácio de 4:1 apresentam uma perda de carga de cerca de 5 vezes menor aos 9:1. Esta diferença considerável era de esperar, visto que a contração da seção de passagem do escoamento ser bastante maior para os convergentes de 9:1. No entanto, estes resultados não têm em consideração o efeito da perda de carga associada à rede de alisamento de escoamento a implementar a montante do convergente, na câmara de tranquilização. Não foi analisada esta componente pois a definição da porosidade do elemento de redução de turbulência, e consequentemente a sua perda de carga, não fazem parte do âmbito deste trabalho. Por esse motivo não é possível por enquanto comparar os convergentes com diferentes rácios entre as áreas de entrada e de saída, de forma equitativa à da instalação final.

Os convergentes que apresentam um rácio de 4:1 possuem uma câmara de tranquilização com menor área de secção, pelo que a velocidade do escoamento na secção da rede é maior do que a apresentada pelos convergentes com rácio 9:1. Visto que a perda de carga localizada aumenta quadraticamente com a velocidade do escoamento (equação 2.2), a perda de carga associada a uma rede com a mesma opacidade, será maior num convergente 4:1 do que num 9:1, pelo que dissipa mais energia do escoamento.

A decisão através deste critério de análise, a escolha do convergente mais eficiente em termos de rendimento do sistema, dependeria de um balanço da perda de carga correspondente à introdução de uma rede de alisamento de escoamento. Se a perda de carga associada à rede introduzida num convergente com rácio de áreas de 4:1 for inferior a 175 Pa, compensa segundo este critério utilizar este tipo de convergente. Caso contrário, se esta for superior, é necessário averiguar se vale a pena adotar um convergente 9:1, dependendo da perda de pressão apresentada pela rede neste caso. Assim, sem possuímos o valor da perda de carga verificada pela combinação do elemento de redução de turbulência e do convergente, não é possível tomar uma decisão segundo o critério da perda de carga do convergente.

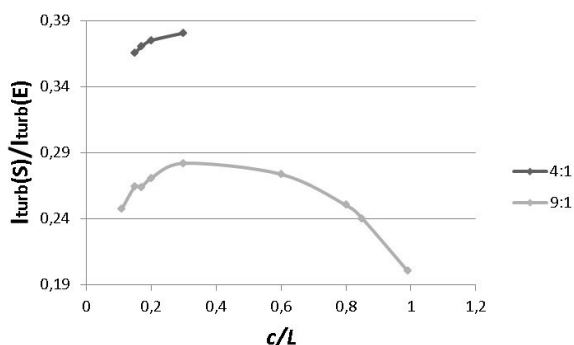
O resultado apresentado na Figura 4.32 apresenta variação da perda de carga associada aos contornos com diferentes valores de  $c/L$ , para o rácio de áreas de 9:1. Os dados sugerem, ao contrário do que se poderia julgar, que a perda de carga é maior nos convergentes que apresentam um contorno mais suave e um escoamento mais uniforme – contornos com  $c/L$  igual a 0,30 e 0,60 – e menor nos casos que apresentam uma superfície que varia mais abruptamente – casos extremos dos valores de  $c/L$ , de 0,11 e 0,99 que supostamente apresentam recirculações segundo os estudos apresentados anteriormente. Nesse sentido, e atendendo à intensão de se optar por convergentes com o menor comprimento possível, seria preferível aproximar a escolha do nosso convergente para formatos mais próximos da zona interdita à esquerda do ábaco. No entanto esta indicação é contrária à demonstrada pelos indicadores de qualidade de escoamento estudados, considerados por nós de maior importância, na secção 4.2 (ex.:  $C_{pe}$ ,  $C_f$  e  $H$ ). Além disso, a diferença da perda de carga entre os diversos contornos apresentados na Figura 4.32 não é significativa – inferior a 0,02% – pelo que não se considera este critério relevante para a determinação do melhor valor de  $c/L$  para o convergente.

### 4.3.2 Variação da intensidade turbulenta

Apesar de o estudo do presente trabalho não contemplar os elementos do túnel aerodinâmico que têm por objetivo reduzir mais a intensidade do turbulenta do escoamento – os elementos de alisamento de escoamento – são tiradas conclusões sobre o efeito desempenhado pelo contorno do convergente. Uma das funções mais importantes de um convergente é reduzir a intensidade turbulenta presente no escoamento do seu interior. Os resultados apresentados na Figura 4.33 e comparam a intensidade turbulenta ( $I_{turb}$ ) dos convergentes com rácios de áreas de 4:1 e de 9:1. A leitura dos valores da  $I_{turb}$  é realizada nas secções de entrada e de saída dos convergentes: secções S5 e S8, de acordo com a Tabela 3.3.

Os resultados sugerem que os convergentes com um rácio de 9:1 apresentam de facto uma redução de  $I_{turb}$  maior, de 86% face aos homólogos com rácio de 4:1. A diferença entre eles

é assim bastante significativa, sustentando o argumento de que o convergente com rácio de 9:1 comprova ser que a melhor opção de construção para o convergente, segundo este indicador.



**Figura 4.33 – Variação da intensidade turbulenta entre as secções de saída e de entrada do convergente, mostrando que o rácio de áreas 9:1 apresenta a maior redução de turbulência**

Observa-se que os convergentes com um rácio de áreas de 4:1 apresentam uma redução de intensidade turbulenta no escoamento de 63% em média, enquanto que, os convergentes com um rácio de 9:1 reduzem em cerca de 75%.

O motivo principal para que os convergentes com rácio de áreas de 9:1 apresentem maior redução da intensidade turbulenta face aos de 4:1, deve-se ao facto de acelerarem mais o escoamento, propiciando o estiramento dos vórtices ainda existentes no escoamento, resultantes da passagem pela rede de redução de intensidade turbulenta na câmara de tranquilização, facilitando a quebra dos filamentos dos vórtices, tal como descrito no capítulo 2.1.3.6. Conclui-se assim que o potencial de redução de turbulência no convergente é maior, quanto maior a redução da área da secção do convergente – mas não em demasia para não aumentar desnecessariamente a perda de carga como visto na secção 4.3.1. Aliando este facto à menor dissipação de energia (perda de carga) relativa aos elementos de redução de turbulência a instalar na câmara de tranquilização, considera-se o *layout* 9:1 como a melhor escolha para o convergente do túnel aerodinâmico. Reitera-se assim a indicação mais comumente suportada na literatura.

Relativamente aos diferentes valores de  $c/L$  associados aos contornos, para um mesmo valor de  $D_0/D$ , os dados sugere que a  $I_{turb}$  é inferior para os convergentes que apresentem valores de  $c/L$  próximos das zonas onde pode existir recirculação, segundo os indicadores estudados no capítulo anterior. Isto significa que convergentes caracterizados por valores de  $c/L$  intermédios, com um contorno mais «suave», apresentam uma menor redução de turbulência no escoamento, contrariamente ao que seria de esperar.

Centrando a discussão nos convergentes com menor comprimento – visto ser preferencialmente essa a nossa escolha para o túnel aerodinâmico a construir – tendo por base os dados da  $I_{turb}$  nas seções de entrada e de saída, apresentados na Tabela 7.2 da página 123. Um dos motivos pode dever-se ao facto de a intensidade turbulenta na seção de entrada ser superior nos casos que apresentam valores de  $c/L$  baixos (entre 0,11 e 0,17) face aos imediatamente acima (entre 0,20 e 0,60), decorrente da presença de turbilhões nessa região. No entanto, apesar de a intensidade turbulenta na seção de saída dos convergentes de  $c/L$  intermédios ser superior, as

diferenças entre os valores de  $I_{turb}$  são baixas: entre os convergentes com  $c/L$  de 0,11 e 0,30 a diferença na redução da turbulência foi inferior a 4%. Deste modo não é expressiva a diferença da  $I_{turb}$  para convergentes com diferentes valores de  $c/L$ , pelo que não constitui um critério de seleção que se sobreponha a fatores de qualidade de escoamento mais importantes, acerca da existência de separação no escoamento ( $H$ ,  $C_{pe}$ , etc).

Em relação aos níveis de  $I_{turb}$  obtidos na secção de saída do convergente  $c/L=0,30$  – que constituirá a entrada da secção de teste – foram elevados para o escoamento apresentado por um túnel aerodinâmico, cerca de 1,2%. No entanto encontra-se na gama dos valores obtidos por outros estudos da literatura. Este valor será melhorado com a aplicação de elementos de redução de turbulência do escoamento a serem instalados na câmara de tranquilização (preferencialmente redes de alisamento de escoamento).

### 4.4 Projeto do Convergente

Relembramos que o estudo realizado (e apresentado anteriormente) diz respeito a convergentes axissimétricos. Agora vamos estender a aplicabilidade do ábaco para casos de secção retangular, escolhendo para tal um comprimento característico que permita através do estudo do diâmetro no ábaco de Levin representar a secção que pretendemos recriar. É necessário encontrar o melhor método para relacionar o comprimento característico da secção retangular com os diâmetros estudados relativos ao ábaco.

De acordo com o estudo e as conclusões obtidas através das simulações bidimensionais realizadas no âmbito deste trabalho, é necessário criar um projeto para o túnel aerodinâmico a construir, de modo a servir de base para estudos numéricos futuros mais aprofundados. O contributo deste trabalho consiste no dimensionamento do convergente. Assim, aproveitando as simulações bidimensionais realizadas para o estudo do ábaco (sobre condutas circulares), é necessário retirar conclusões para o túnel (tridimensional) de secção retangular. Isto significa que as realizadas – e respetivas conclusões – são para túneis aerodinâmico de secção circular, que não corresponde à geometria definida para a realização do presente túnel. Desta forma, pretende-se compreender qual a melhor forma de converter as «orientações» proporcionadas pelo ábaco, e as respetivas conclusões obtidas, de um convergente de secção circular para um de secção retangular. Não existe apenas uma forma de se efetuar esta associação, pelo que foram estudados três critérios.

As considerações seguintes decorrem das informações acerca do túnel aerodinâmico apresentadas no capítulo 1.1.1. A secção de entrada do convergente estudado coincidente com a secção de saída da câmara de tranquilização. Convencionou-se que esta secção possui formato quadrangular, pelos motivos de versatilidade de montagem, com dimensões iguais para os diferentes casos. A secção de saída do convergente foi definida como retangular, com dimensões de 600 e de 400 mm para as arestas laterais da secção (Figura 1.1), perfazendo uma área de saída de 0,24 m<sup>2</sup> (equação 4.1).

$$0,400 \times 0,600 = 0,240 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

Através dos estudos realizados, optou-se por um convergente com a razão de áreas de 9 para 1 entre a secção de entrada e a de saída. Deste modo, a área da secção de entrada é de  $2,16 \text{ m}^2$  (equação 4.2).

$$0,240 \times 9 = 2,16 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

$$\sqrt{2,16} \cong 1,47 \text{ m} \quad (4.3)$$

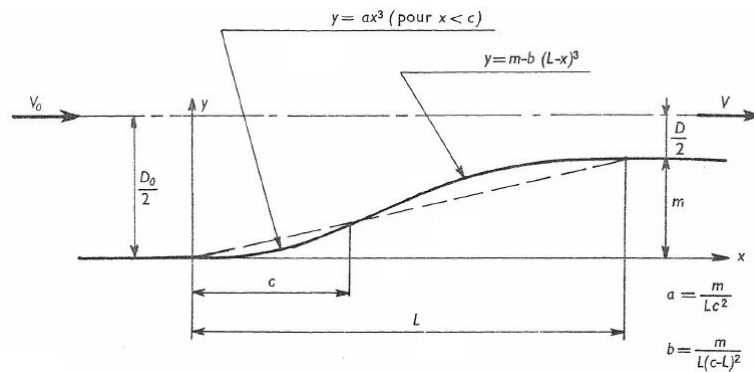
A área de saída será de  $0,24 \text{ m}^2$ , pelo que a área da entrada do convergente será  $2,16 \text{ m}^2$ , pelo que a dimensão da aresta da secção quadrangular é de  $1470 \text{ mm}$  (equação 4.3). As dimensões das secções de entrada e de saída encontram-se assim totalmente determinadas, resta definir a forma do contorno.

#### 4.4.1 Métodos de interpretação do ábaco

A definição do formato do convergente, como referido anteriormente, baseia-se no ábaco decorrente dos resultados experimentais obtidos por Levin em 1968 (ver Anexos) destinado a condutas circulares. Constitui uma boa aproximação para a geometria inicial. No entanto o ábaco em questão foi criado com base em condutas de secção circular, enquanto a secção do nosso convergente varia de uma secção quadrangular à entrada ( $1470 \times 1470 \text{ mm}^2$ ) a retangular à saída ( $400 \times 600 \text{ mm}^2$ ). De facto a nossa geometria não é a mais indicada para a utilização direta do ábaco, mas não é impeditiva de se utilizar os seus dados: estes são a melhor estimativa ao nosso alcance. A questão é qual o melhor método a empregar na interpretação do ábaco.

Nos subcapítulos anteriores determinou-se que a melhor geometria para o convergente, para uma conduita circular, deveria seguir uma razão de  $c/L$  igual a  $0,3$ , correspondente à coordenada  $L/D_0$  de  $1,375$ . No entanto, para a construção do túnel aerodinâmico é necessário obter os polinómios de 3.º grau que definem o formato do contorno de uma conduita de secção retangular. Nesse sentido, com o propósito de utilizar as expressões fornecidas pelo ábaco do estreitamento hidráulico direccionado para condutas circulares, é necessário considerar um método para que seja possível aplicá-las a condutas com secção retangular. Assim são considerados três métodos de modo a aplicar as expressões do ábaco ao caso tridimensional, sendo eles: aresta, área e diâmetro hidráulico.

Apesar de as dimensões das secções de entrada e de saída se encontrarem bem definidas – secção quadrada com  $1470 \text{ mm}$  de lateral e secção retangular de  $400 \times 600 \text{ mm}^2$ , respetivamente – cada método considera um valor de leitura de cada secção transversal do convergente de uma forma diferente. Isto significa que cada método distinto considera que a área efetiva da secção da conduita para efeitos de leitura do ábaco é diferente, por outras palavras, os valores das áreas e diâmetros associados à secção de entrada e de saída do túnel aerodinâmico são diferentes para cada método. Ou seja, para efeitos de determinação dos pontos no ábaco (diâmetros  $D_0$  e  $D$  para uma conduita circular) associados a secções iguais, os pontos a considerar por cada método são ligeiramente diferentes, possuindo todos eles a coordenada  $L/D_0$  de  $1,375$  em comum – valor do estudo de otimização do contorno que deverá ser mantido.



**Figura 4.34 – Contorno do convergente e respectivas relações polinomiais que o descrevem [L. Levin, 1968].**

Descrevem-se nos subcapítulos seguinte os três métodos considerados para a interpretação do ábaco do estreitamento hidráulico e as respectivas formas de cálculo. Todas as metodologias têm em comum a característica de considerar, para efeitos de cálculo de  $m$  (ver Figura 4.34), que as dimensões das secções de entrada e de saída estão definidas à partida, apresentando-se como constrangimentos do projeto. Dessa forma o cálculo de  $m$  é dado pela expressão 4.4.

$$m = (D_0 - D)/2 \quad (4.4)$$

Sendo que para o caso do convergente retangular tridimensional, entende-se  $D_0$  e  $D$  como as dimensões das arestas da secção de saída. Assim, o valor de  $m$  considerado nos diversos métodos para a face F400 e F600 (face do convergente com aresta de dimensão de 400 mm na secção de saída e face com aresta de dimensão de 600 mm na secção de saída, respetivamente) igual a 535 mm e 435 mm, respetivamente.

No entanto para a determinação da razão  $D_0/D$  e no cálculo de  $L$ , para os valores  $D_0$  e  $D$  considerados são os valores calculados por cada um dos métodos de interpretação do ábaco. Para determinar o valor do comprimento do convergente qualquer que seja o método, todas as metodologias têm por base que o valor de  $L/D_0$  é 1,375.

O pequeno comprimento do túnel aerodinâmico é um fator importante porque a CL pretende-se fina de modo a maximizar a área da secção útil para a realização de ensaios aerodinâmicos, sendo que  $\delta$  irá aumentar com o comprimento  $L$  do túnel. Além disso as suas dimensões estão bastante limitadas pelo espaço disponível no LMFTA.

#### 4.4.1.1 Método do círculo inscrito

Baseia-se na dimensão da aresta da face do convergente cujo contorno se pretende determinar. Considera que as expressões que definem a geometria do convergente para um convergente circular se aplicam de igual modo à geometria do contorno de um convergente com secção retangular. As expressões dos polinômios são obtidas a partir da aplicação direta do ábaco, bastando considerar as dimensões das arestas como valores dos diâmetros das secções de entrada e de saída para fins de leitura de ábaco, para a face do convergente a determinar –

i.e., considerando um círculo inscrito. Significa também que as equações que definem a geometria são diferentes consoante o caso em que estamos a considerar a face do convergente em que a aresta da secção de saída é de 400 mm ou de 600 mm, e consequentemente o ponto de inflexão é também diferente – caracterizado pelo valor de abcissa  $c$  na Figura 4.34.

Começa-se por calcular o comprimento do convergente a partir da relação  $L/D_0$ . O valor de  $D_0/D$  é determinado para cada face do convergente em estudo, um valor de  $D$  diferente conforme se trate da F400 ou F600. Consoante se o valor da aresta de saída for de 400 e de 600 mm, os valores de  $D_0/D$  são respetivamente 3,675 e 2,45. Desta forma determinam-se os dois pontos correspondentes no ábaco, distintos para cada uma das faces do convergente, e consequentemente, com valores diferentes de  $c/L$ . É curioso verificar que através deste método se obtêm contornos que se afastam ligeiramente da do valor da solução de  $c/L$  para o caso bidimensional. Assim o cálculo das expressões polinomiais de cada uma das faces é independente.

De seguida, para cada uma das faces é calculado o respetivo valor de  $c/L$ , o que permite determinar a distância axial entre a secção de entrada do convergente e o ponto de inflexão do contorno ( $c$ ). Desta forma determinam-se os coeficientes  $a$  e  $b$  apresentados no ábaco do estreitamento hidráulico (Figura 4.34), sendo possível obter as expressões das equações polinomiais que permitem caracterizar a geometria de cada uma das faces do convergente.

#### 4.4.1.2 Método da área

A segunda abordagem passa por considerar as áreas das secções de entrada e de saída do convergente, descobrir o diâmetro dos círculos que possuem áreas de igual valor e considerar essas dimensões, como se o convergente possuísse secção circular ao invés de retangular. Isto é, para efeitos de leitura do ábaco considerar a sua secção como sendo circular, equivalente em área à verificada no caso real (retangular). Os diâmetros equivalentes das secções circulares de entrada e de saída do convergente são obtidos segundo a equação 4.5.

$$D = 2\sqrt{A/\pi} \quad (4.5)$$

A determinação do comprimento do convergente decorre da expressão de  $L/D_0$ , considerando o diâmetro da secção circular equivalente com igual área à da secção da câmara de tranquilização. A razão  $D_0/D$  que neste caso mantém-se igual a 3, pelo que através do ábaco verifica-se que o convergente encontra-se associado à isolinha  $c/L$  de valor 0,3, da qual se determina o valor de  $c$ . A determinação das equações polinomiais para as faces F400 e F600 diverge apenas no valor de  $m$  considerado para cada.

No entanto é possível antever que esta abordagem não será a mais correta, pois considera que o escoamento no interior de condutas circulares e retangulares com igual área de secção, com geometrias diferentes, se comportam de igual modo. Estas condutas não são equivalentes em termos de caudal, pois esta última terá um escoamento mais restringido do que a primeira.

#### 4.4.1.3 Método do diâmetro hidráulico ( $D_H$ )

Consiste em calcular o diâmetro hidráulico das secções de entrada e de saída do convergente, sendo esse valor o utilizado para escolha de pontos no ábaco. Embora para efeitos de

escolha de pontos no ábaco, se trate de secções circulares, na realidade, geometricamente consistem em secções quadrangulares. Devido à definição de diâmetro hidráulico, o valor do diâmetro das secções circulares é igual ao valor da aresta das secções quadradas.

A última abordagem consiste em considerar para os valores dos diâmetros das secções de entrada e de saída do convergente, com vista a aplicar no ábaco, os respetivos valores dos seus diâmetros hidráulicos.

$$D_H = 4 A / P \quad (4.6)$$

O restante processo é análogo ao descrito para o caso anterior. A determinação do comprimento do convergente decorre uma vez mais da expressão de  $L/D_0$ , considerando neste caso o diâmetro da secção de entrada calculado pela expressão 4.6. A razão  $D_0/D$ , entre os valores dos diâmetros hidráulicos calculados, possui sensivelmente o valor de 3,06, pelo que obtém-se através do ábaco que o valor de  $c/L$  é aproximadamente de 0,294. A determinação das equações polinomiais para as faces F400 e F600 diverge tal como no caso anterior apenas no valor de  $m$  considerado para cada.

### 4.4.2 Comparação dos métodos

A Figura 4.35 pretende representar a diferença entre os diâmetros das secções de entrada e de saída do convergente, consideradas pelos diferentes métodos de interpretação do ábaco do estreitamento hidráulico. O valor deste diâmetro destina-se à aplicação do ábaco decorrente do facto de este ser destinado a condutas circulares. As dimensões reais das secções encontra no entanto bem definidas (representadas a traço contínuo preto grosso), mas a área de passagem de fluido no convergente considerada segundo cada método é diferente. Isto significa que cada método pode originar diferenças na determinação do contorno do convergente, ainda que ligeiras.

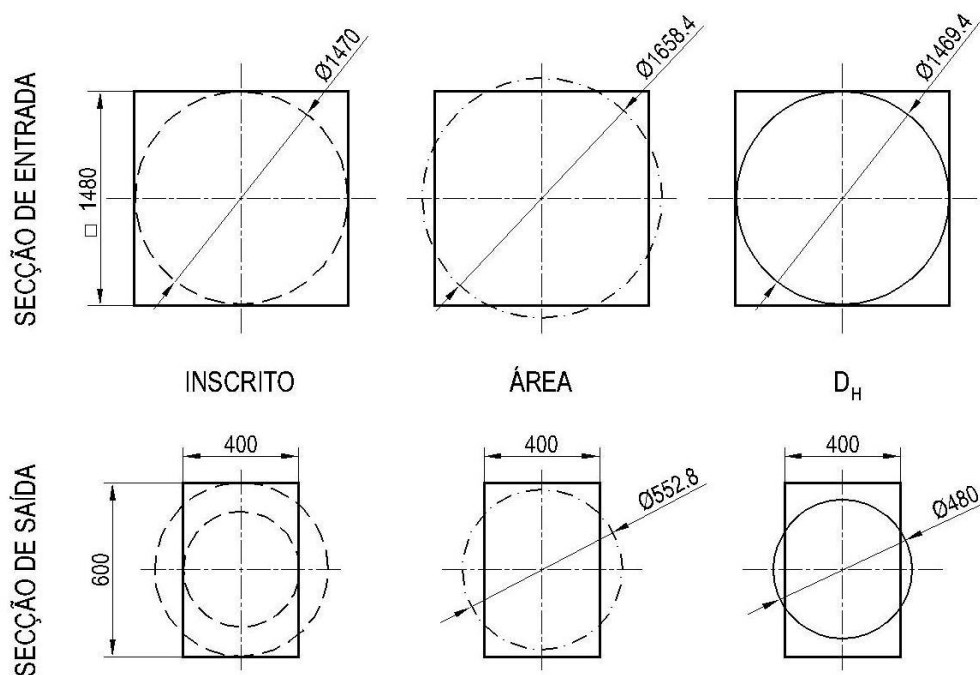
Observa-se que as áreas consideradas para a secção de saída, segundo os diversos métodos, são bastante distintas, apesar de todas dizerem respeito à mesma secção. Segundo o método do diâmetro hidráulico, o diâmetro da secção (e consequentemente a área disponível para o escoamento) é consideravelmente menor (480 mm) que o diâmetro obtido considerando o método da área (aproximadamente 552,8 mm). O método do círculo inscrito considera para efeitos de leitura do ábaco cada face do contorno, para arestas de dimensões diferentes, separadamente. Desse modo os diâmetros considerados para as faces F400 e F600 são respetivamente 400 e 600 mm.

É possível deduzir que os critérios da Área e do  $D_H$  consideram que o convergente apresenta uma secção mais estrangida do que o método (do círculo) Inscrito. O método Inscrito considera que a condução é menos estrangida do que de facto é. O Diâmetro hidráulico, ao considerar a além da área a geometria da secção, contabiliza a existência de escoamento secundário, ao considerar os seus efeitos minora o valor do diâmetro da condução.

É possível constatar na Tabela 4.8 que a localização do PI e o comprimento determinado para o convergente através dos diferentes métodos é diferente. Por exemplo, os métodos do círculo inscrito e do diâmetro hidráulico têm resultados muito próximos em termos de comprimento do convergente, no entanto produzem geometrias distintas visto que a localização dos



seus PI a distâncias distintas da secção de entrada, como é possível observar pela Figura 4.36. O comprimento do convergente obtido através do método da área é o maior com 2280 mm, 200 mm maior que o obtido através de qualquer dos outros métodos. Nesse sentido apresenta-se como um método menos interessante, visto que um dos objetivos para a determinação do convergente é que este seja o mais curto possível.



**Figura 4.35 – Representação dos diâmetros considerados através dos diferentes métodos, nas secções de entrada e de saída, para a utilização do ábaco de Levin.**

Pela observação dos valores de  $c/L$  e  $c$  verifica-se que o método do círculo inscrito varia consideravelmente a localização do PI em torno do valor de  $c/L$  definido como ótimo, o 0,30. Nesse sentido, na face do convergente que apresenta um maior estreitamento, a face F400 – sendo também onde presumivelmente é mais crítico, devido à probabilidade de ocorrer separação do escoamento – o ponto de inflexão antecipa-se, aproximando-se bastante de  $c/L$  igual a 0,20 e consequentemente da zona interdita. Apesar de que pelos resultados da análise 2D se conclui que o convergente definido por  $c/L=0,20$  não apresenta recirculação no seu interior, mas que os indicadores e parâmetros estudados indicam que o escoamento tem menor qualidade que o convergente 0,30 apresenta. Por esse motivo, o método do círculo inscrito aparenta também não ser o melhor. Os contornos segundo os métodos da Área e do  $D_H$  são muito semelhantes na forma como posicionam o PI.

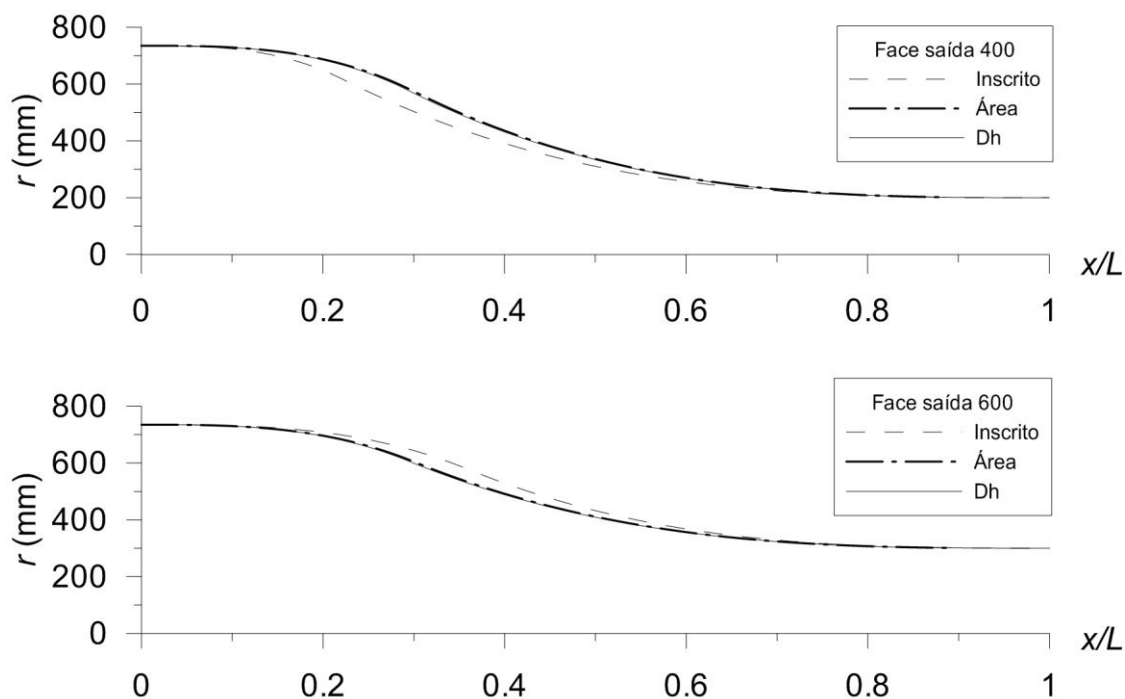
Na Figura 4.36 são apresentadas as geometrias dos contornos obtidos a partir dos três métodos de leitura do ábaco, ao adimensionalizar a dimensão do eixo axial em relação ao seu comprimento. A imagem superior refere-se ao contorno da face F400 do convergente e a inferior é relativa à face F600. De forma a complementar o estudo dos formatos dos convergentes, Figura 4.37 representa a variação da área da secção do convergente ao longo do eixo axial, adimensionalizado da mesma forma.

**Tabela 4.8 – Obtenção de dimensões distintas para diferentes características do convergente através de diferentes métodos**

Dimensões	Métodos			
	Inscrito		Área	Diâmetro hidráulico
	F400	F600		
$c/L$	0,222	0,359	0,300	0,294
$c$ (mm)	450	726	684	594
$L$ (mm)	2021		2280	2020

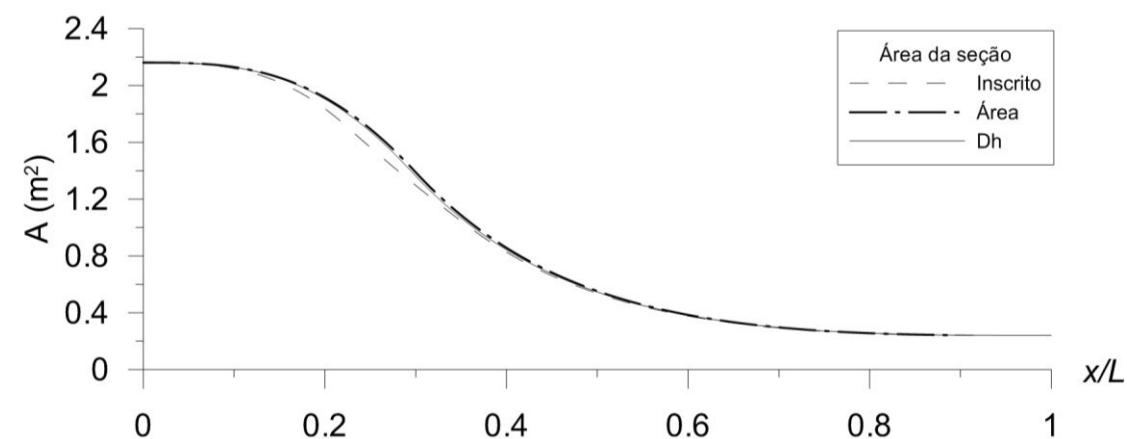
No que diz respeito à face F400 (imagem superior da Figura 4.36), como seria de esperar, os valores dos raios dos convergentes associados aos métodos da Área e do Diâmetro hidráulico são superiores ao raio do associado ao método do círculo inscrito, por o valor de  $c/L$  ser inferior antecipar a ocorrência do PI. O oposto sucede com os contornos relativos à face F600, por o valor de  $c/L$  associado ao método do círculo inscrito ser superior.

Ao comparar o declive das superfícies definidas segundo os diversos métodos, no ponto de inflexão relativo a cada um, verifica-se que na face F400, a superfície do convergente definida pelo método do círculo inscrito é a mais inclinada. De notar que esta é presumivelmente a face mais crítica para a ocorrência de separação do escoamento, por apresentar um estreitamento maior.

**Figura 4.36 – Contornos dos convergentes obtidos através de diferentes métodos de interpretação do ábaco: as silhuetas associadas aos métodos Área e  $D_H$  são muito semelhantes.**

Considerando os contornos dos convergentes associados aos diferentes métodos retratadas no gráfico anterior, é agora possível analisar como variam as áreas da secção ao longo do eixo longitudinal dos convergentes. Pode revelar-se útil identificar em que método o ponto de inflexão da superfície ocorre numa secção do convergente em que a área da secção é menor, indicando que o escoamento nessa secção possui maior velocidade. Este é um fator indesejável, pois facilitaria a separação do escoamento da parede, introduzindo inevitavelmente turbulência no escoamento.

Considerando a inclinação das paredes dos convergentes no PI, apresentadas na Figura 4.36, com a área da secção associada a cada uma delas, é possível analisar que a face do contorno presumivelmente mais crítica, a F400, definida pelo método do círculo inscrito, apresenta a secção com menor área no PI. Ou seja, para além de apresentar o maior declive da superfície do convergente, verifica a maior velocidade do escoamento de entre os vários métodos, nas secções onde ocorrem os seus PI. Prova-se assim que este método deve ser preterido em relação aos restantes por potenciar a separação do escoamento da parede do convergente.



**Figura 4.37 – Variação da área da secção do convergente ao longo do comprimento axial: valor dos métodos Área e  $D_H$  são muito semelhantes**

Os convergentes definidos pelos métodos da Área e do  $D_H$ , são os que introduzem menos turbulência no escoamento. Ambos apresentam um  $c/L$  sensivelmente igual a 0,30, que no estudo do ábaco provou ser o melhor valor para esta relação. Possuem um contorno muito semelhante, considerando a dimensão longitudinal adimensionalizada pelo seu comprimento, no entanto, existe um fator diferenciador. O convergente definido pelo método da Área possui um comprimento 13% maior que o definido pelo  $D_H$ . Este fator aliado ao facto de o método do  $D_H$  contabilizar para a definição do contorno que parte da área da secção é ocupada por escoamentos secundários, a escolha do método a utilizar recai sobre o do diâmetro hidráulico.

Assim, tendo em consideração as conclusões do estudo do ábaco, permitindo definir o contorno com o melhor desempenho relativamente à qualidade do escoamento, e do melhor método para aplicar as expressões do ábaco de condutas circulares a retangulares, o método do diâmetro hidráulico, foi possível dimensionar o convergente do túnel aerodinâmico a construir

futuramente no LMFTA. O projeto do túnel aerodinâmico de sopro encontra-se no final do capítulo Apêndices, apresentando-se o desenho de conjunto na Figura 7.28, o alçado principal na Figura 7.29 e a planta na Figura 7.30.

## 4.5 Resultados da modelação da rede por UDF

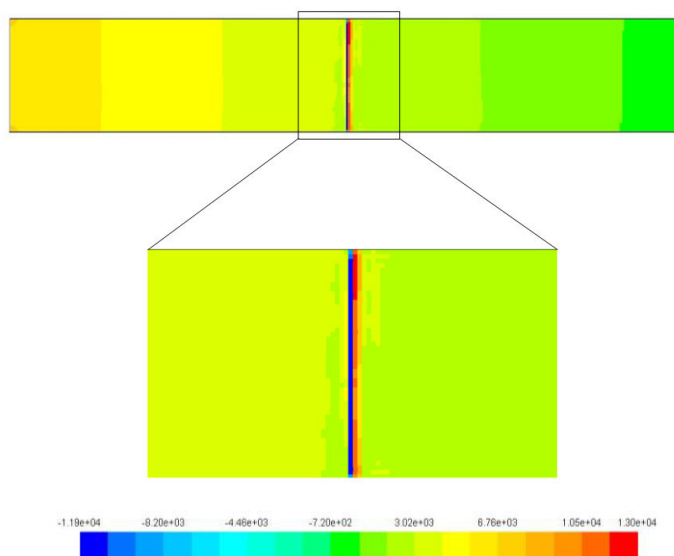
Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos através da implementação das *UDF* criadas com a finalidade de modelar a rede (ver secção 2.1.3.6.2) a ser montada na câmara de tranquilização. De lembrar que o intuito é recriar a perda de carga e não estudar o efeito no escoamento das grandezas  $\kappa$  e  $\epsilon$ . Pretende-se que estes resultados e a *UDF* criada contribuam para a sua implementação e recriar o efeito da queda de pressão em trabalhos futuros.

A modelação da queda de pressão através da macro `DEFINE_ADJUST` não ocorreu da forma desejada. Foi obtido um resultado sem sentido físico. A variação de pressão introduzida no modelo é implementada na divisão das faces, a meio comprimento da conduta como espetável. No entanto, o escoamento não é afetado pela queda de pressão que se pretendeu incutir nessa secção. Parece ocorrer antes o contrário, visto que após a queda abrupta de pressão, esta volta a aumentar mais ainda, antes de se fixar em valores praticamente iguais aos verificados anteriormente à secção onde se encontra afixada a rede: há que considerar a perda de carga associada a um escoamento no interior de uma conduta.

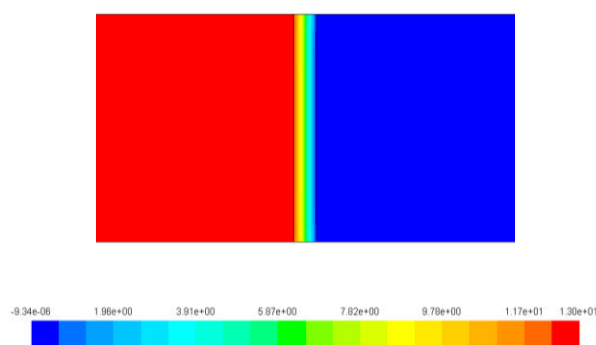
A variação de pressão ocorre no entanto inteiramente em 3 filas de células transversais ao escoamento sem que seja afeta ao escoamento a jusante. De notar que a ferramenta computacional não variar quaisquer parâmetros além da velocidade e da pressão no escoamento – sem modificar a massa volúmica e a temperatura do fluido. Isto significa que apesar de implementada a perda de carga na secção pretendida, ela não afeta o escoamento. O resultado em questão obtido é apresentado na Figura 4.38, onde são apresentados os *Counters* relativos à pressão no interior da conduta, resultantes do *Post-processing* do FLUENT. A variação longitudinal gradual de pressão deve-se à perda de carga no interior da conduta, onde o sentido do escoamento ocorre da esquerda para a direita.

Isto pode indicar que o *software* não foi construindo de modo a implementar a perda de carga desta forma, introduzindo toda a diminuição de pressão no escoamento com a simples passagem do escoamento por uma secção. Ou seja, este não aceita uma secção de perda de pressão acentuada, da forma como se pretendeu implementar, não foi concebido dessa forma. Este primeiro resultado levou-nos a criar a segunda *UDF*.

No segundo caso, onde se implementou a função `DEFINE_SOURCE` obteve-se a solução desejada, revelando-se o código para esta função bastante mais simples. Praticamente toda a queda de pressão ocorre no meio poroso definido numericamente, levando a uma perda de carga localizada no escoamento interior da conduta. A variação de pressão ocorreu gradualmente, mas por inteiro, na região destacada para o efeito.

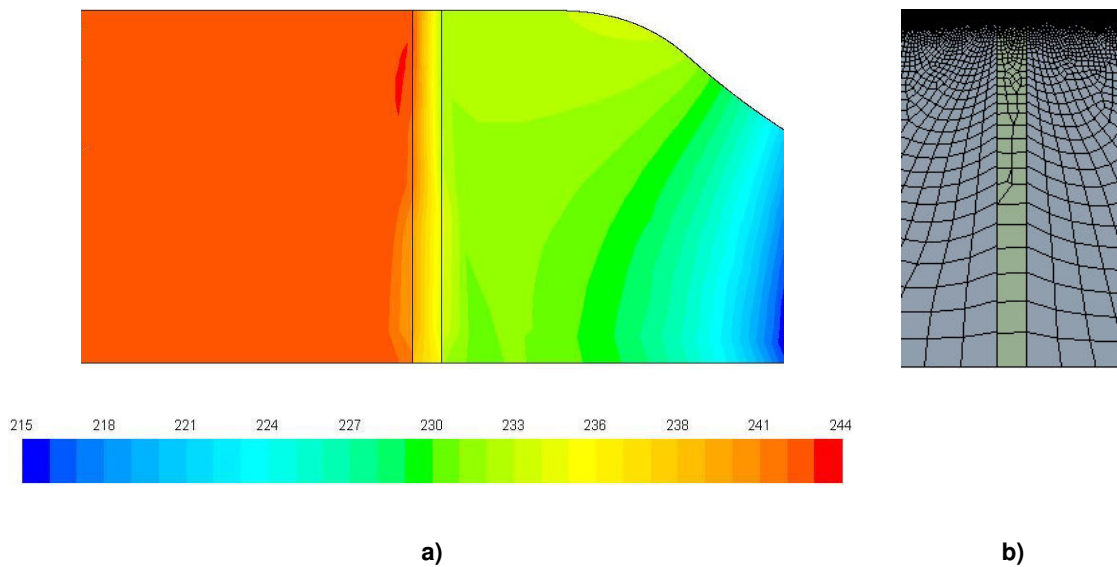


**Figura 4.38 – Variação incorreta da pressão no interior de uma conduta devido à implementação da macros `DEFINE_ADJUST`, mostrando que a implementação da *UDF* é inapropriada.**



**Figura 4.39 – Variação pretendida da pressão no interior de uma conduta devido à implementação da macros `DEFINE_SOURCE` na *UDF*.**

Após se implementar com sucesso a *UDF* no caso de uma conduta simples, a mesma é aplicada a montante de um convergente axissimétrico, de forma idêntica à que deverá ser aplicada nos estudos futuros da modelação do túnel aerodinâmico, como todos os componentes que o constituem. Visto se tratar apenas de uma simulação para testar o funcionamento da *UDF* não foi atribuída muita importância à forma mais correta de discretizar o domínio (nível de refinamento da malha no interior do meio poroso). Na Figura 4.40 a) encontra-se a aplicação da *UDF* do caso da conduta, aplicada ao caso do convergente. É possível verificar a variação de pressão que ocorre na zona do domínio onde foi «introduzida» a rede – pelo menos o seu efeito em termos de pressão – assim como em seguida a variação de pressão ao longo do estreitamento do convergente. A considerar que se trata apenas de um exemplo de aplicação, pelo que a ordem de grandeza da variação da pressão apresentada não contém significado algum. A perda de carga efetiva apenas será estudada em trabalhos futuros, pelo que o valor aqui apresentado não é determinístico, não possui relevância, trata-se apenas de um exemplo de aplicação da *UDF*.



**Figura 4.40 – Contornos da queda de pressão associada à implementação do meio poroso (a) e detalhe da respectiva malha de discretização (b).**

Na Figura 4.40 a) são apresentadas as linhas de separação das faces do domínio que delimitam a zona destinada à implementação do meio poroso, entre as duas faces que compõem o restante domínio. Como a figura demonstra, de modo a implementar a *UDF* que define a zona associada ao meio poroso foi necessário que esta possui-se espessura, ao invés de uma entidade que não a possua como um plano (ou no caso bidimensional uma linha), como no caso da aplicação da *UDF* retratada na Figura 4.38.

A perda de carga implementada no modelo não depende da espessura da zona modelada para funcionar como meio poroso. É definida como se de uma perda de carga localizada se trata-se, através da equação 4.7 contida na *UDF*, o que significa que depende da massa volúmica do fluido, do quadrado da velocidade do escoamento e do valor por nós atribuído ao parâmetro adimensional de perda de carga  $\xi$ . Assim a perda de carga verificada não depende da espessura definida para o meio poroso, mas antes dos valores adotados para  $\xi$  na própria *UDF*. Portanto a espessura do meio poroso a aplicar no caso real – leia-se espessura de redes em série – em nada é restringida pela dimensão da zona porosa modelada, apenas pelos valores adotados na *UDF*.

$$\Delta P = -\rho V^2 \xi / 2 \quad (4.7)$$

Visto que a perda de carga varia com o quadrado da velocidade, tendo em consideração que a velocidade do escoamento é superior na zona central da conduta e menor junto da parede, significa que a queda de pressão é também maior junto ao eixo de simetria da conduta, embora os resultados dos contornos da pressão na Figura 4.40 a) aparentem o oposto. No entanto não existe qualquer erro de aplicação. Verificando que o perfil de velocidades na secção de entrada do meio poroso se apresenta como turbulento completamente desenvolvido, este resultado deve-se principalmente a duas razões. O meio poroso cria um efeito heterogêneo de perda de carga

ao longo da secção transversal da conduta (maior na zona do eixo de simetria do que próximo à parede devido à velocidade do escoamento).

Devido à maior perda de carga próxima ao eixo de simetria da conduta, o escoamento apresenta uma tendência para se desviar da zona central da conduta, pelo que as linhas de corrente se aproximam da superfície do convergente. Além disso, os contornos de pressão apresentados são fruto da resolução das equações de governo do escoamento na malha de discretização grosseira do meio poroso, retratada na Figura 4.40 b). Visto que a malha é mais densa na proximidade da parede do convergente, o grau de detalhe e precisão os resultados da variação de pressão são apresentados são superiores do que na zona próxima do eixo de simetria do convergente. Visto que na região próxima do eixo axissimétrico possui uma malha grosseira (uma célula pela espessura do meio poroso) as variações de pressão apresentadas na Figura 4.40 a) são retratadas de forma menos precisa, devido se deverem à média da pressão verificada entre os nós do meio poroso e os nós adjacentes estes, bem mais afastados. Significa que no caso de se pretender uma descrição precisa da forma como a pressão varia no meio poroso, a malha deverá ser deve ser mais refinada não só próximo da parede do convergente mas também nas proximidades do meio poroso.

Criou-se assim uma *UDF* possível de aplicar em qualquer modelo futuro de forma a simular o efeito de perda de carga, associada à existência de qualquer elemento de redução de intensidade turbulenta no escoamento. A determinação dos valores pretendidos para a perda de carga, a porosidade e o dimensionamento da rede devem ser efetuados em trabalhos futuros.





## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho consiste no estudo inicial do convergente de um túnel aerodinâmico, com vista à realização do projeto mecânico de um túnel aerodinâmico a construir no LMFTA do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI). A definição do desenho do *layout* do convergente é da maior importância. Tem por função acelerar o escoamento da forma mais correta, sem gerar demasiada turbulência, assim como eliminar os vórtices das escalas mais pequenas ainda presentes no escoamento que não foram eliminados previamente pelos restantes constituintes do túnel com essa função.

Trata-se de um estudo de *CFD*, bidimensional, *RANS*, efetuado com o método dos volumes finitos, através do programa comercial ANSYS FLUENT 16.2®. Estudaram-se diferentes geometrias para os convergentes, comparando-se os resultados obtidos com os encontrados na literatura. As malhas foram geradas com a nova ferramenta da ANSYS, o FLUID FLOW, visto que a ferramenta anteriormente usada no NMFTA (GAMBIT®) foi descontinuada. No processo de aprendizagem da nova ferramenta identificaram-se diversos problemas e a sua resolução é discutida na dissertação para benefício de trabalhos futuros.

O suporte principal para a determinação da geometria do convergente incidiu sobre o ábaco do estrangulamento hidrodinâmico de Levin, para condutas circulares, efetuando-se simulações sobre alguns formatos de convergentes definidos no ábaco. Efetuou-se o estudo de diversos pontos sobre a linha das ordenadas  $D_0/D=2$  e  $D_0/D=3$ , relativos a convergentes com rácios de áreas entre a secção de entrada e de saída dos convergentes de 4:1 e 9:1. Comparou-se estes dois tipos de convergentes sobre as mesmas isolinhas  $c/L$  do ábaco, variando apenas os seus valores de  $L/D_0$ . De salientar que o ábaco impõe uma relação de constrangimento forte aos convergentes por ele definidos: a existência de um ponto de inflexão (PI) próximo à secção de entrada implica convergentes mais curtos, enquanto um PI próximo da secção de saída implica convergentes mais longos. Os valores de  $c/L$  estão diretamente relacionados com a localização do PI.

## Conclusões

As conclusões obtidas pelos resultados computacionais relativamente ao contorno do convergente não possuem qualquer suporte experimental que não sejam as medições efetuadas por Levin. O ábaco permitiu, assim, validar os resultados da ferramenta computacional. As medições realizadas por Levin corroboram os resultados obtidos pelo modelo numérico.

Determinou-se que o melhor modelo de turbulência a empregar no estudo *CFD* do escoamento interior do convergente é o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST.

Foram utilizadas diferentes métricas para avaliar a qualidade do escoamento dos diversos convergentes. Nenhum dos métodos mostrou ser por si só um método suficientemente robusto para a identificação de separações ao longo dos modelos estudados. Por esse motivo, é utilizada uma combinação da análise do coeficiente de pressão, estático, no eixo de simetria do domínio computacional ( $C_{pe(\xi)}$ ), na parede sólida do convergente ( $C_{pe}$ ), incluindo a sua taxa de variação  $\left. \frac{dP}{dx} \right|_w$ , o estudo do coeficiente de fricção ( $C_f$ ) e do fator de forma do perfil de velocidades ( $H$ ) ao longo de diversas secções transversais.

O estudo do fator de forma  $H$ , dependente dos valores da espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ) e da espessura de quantidade de movimento longitudinal ( $\theta$ ), avalia a evolução do perfil de velocidades. Verificou-se não ser um método robusto para a análise da qualidade do escoamento, no entanto, foi bastante eficaz a identificar separações em convergentes caracterizados por valores baixos de  $c/L$ . Os valores destes três parâmetros da CL, regra geral, crescem longitudinalmente ao longo do domínio estudado, alcançando o seu máximo na secção de entrada do convergente, diminuindo o seu valor até à secção de saída. O caso  $c/L=0,99$  apresenta uma anomalia em relação aos restantes casos, na secção de saída do convergente, sendo indicadora do deterioramento da qualidade do escoamento.

No estudo dos perfis de velocidades ao longo do domínio computacional foram empregues diferentes técnicas com a finalidade de corrigir os possíveis desvios nos dados – média corrida de 5 pontos, determinação da espessura da CL ( $\delta$ ) através da medição do menor ângulo verificado entre os segmentos de reta formados pelos valores de velocidade nos diferentes nós – melhorando assim a precisão dos resultados obtidos.

A observação de  $C_{pe}$  e  $C_{pe(\xi)}$  demonstra que a evolução do gradiente de pressões é favorável ao longo de todo o comprimento do eixo de simetria do convergente. No entanto, junto à parede do contorno, apesar do decréscimo associado ao aumento da velocidade do escoamento, verifica-se um aumento da pressão estática em torno das secções de entrada e de saída do convergente. Esse aumento é tanto maior quanto mais próximo se encontrar o PI do contorno das secções de entrada ou de saída do convergente. Essas condições de pressão podem causar a separação do escoamento nas secções de entrada e de saída do convergente. Os valores de  $\left. \frac{dP}{dx} \right|_w$  apresentam pequenas variações de valor entre os casos que apresentam recirculação na zona de entrada do convergente face aos que não a apresentam. Conclui-se que o escoamento próximo da secção de entrada do convergente é bastante sensível ao gradiente de pressão.

O estudo de  $C_f$  não é o mais robusto para identificar a zona interdita do ábaco de Levin para valores de  $c/L$  baixos. Não mostra com evidência a ocorrência da separação do escoamento

na metade inicial do convergente, pois devido à elevada área da secção, os valores da tensão de corte são bastante baixos em todos os casos. O seu valor aumenta ao longo do comprimento axial do convergente, com o enchimento do perfil de velocidades em todos os casos, alcançando um máximo, diminuindo após a saída do convergente para um patamar que tende para um valor constante, devido ao desenvolvimento de um perfil turbulento de velocidades totalmente desenvolvido, que ocorre numa conduta de secção constante. Quanto à observação da existência de bolha de recirculação na saída do convergente, verificou-se que o estudo de  $C_f$  seria a forma ideal de o comprovar, identificável por dois mínimos no seu gráfico após uma abrupta redução de valor na secção de saída, correspondentes aos extremos da bolha de recirculação. Não foram observados sinais da bolha de recirculação no caso  $c/L=0,99$ , o caso mais provável de esta ocorrer, concluindo-se, desta forma, que o caso não apresenta separação.

Pelo que se apurou através dos casos estudados, o ábaco decorrente dos resultados experimentais de Levin demarca com bastante exatidão os *layouts* dos convergentes para os quais é espetável existir recirculação, na apelidada “zona interdita”. Através da avaliação das diferentes métricas constatou-se que o escoamento dos convergentes associados a  $c/L=0,11$  e  $0,15$  (no interior e na região limítrofe da zona interdita do ábaco) apresentam recirculação. No entanto, o caso  $c/L=0,17$  deverá ser considerado como parte integrante do limite efetivo da zona interdita devido à possibilidade de apresentar separação no seu escoamento.

Os convergentes que apresentam uma redução de secção mais suave com o comprimento – valores intermédios de  $c/L$ , entre  $0,30$  e  $0,60$  – são os que apresentam um escoamento de melhor qualidade, mais uniforme. O valor da relação  $c/L$  que constitui a melhor escolha para o projeto do convergente do túnel de aerodinâmico encontra-se entre  $0,20$  e  $0,30$ , preferencialmente mais próximo deste último. Esta configuração não apresenta indícios de ocorrer separação de escoamento no seu interior e demonstra o melhor compromisso entre melhor qualidade de escoamento à saída do convergente, menor comprimento total do convergente e menor perda de carga nos elementos de redução de turbulência do escoamento.

Encontraram-se evidências de uma iminente segunda zona interdita para valores de  $c/L$  elevados, à direita do ábaco de Levin, segundo os resultados do gradiente de pressão e do fator de forma  $H$ , para os casos em que o PI se encontra muito próximo da secção de saída. Nos resultados segundo as linhas de corrente do escoamento viscoso, os *contours* da velocidade  $V_x$  e  $C_f$  não antecipam a existência de bolhas de recirculação para quaisquer valores de  $c/L$  elevados.

A acontecer, só para a situação em que o PI da curva do contorno se encontrar sobre a secção de saída do convergente. Nesse caso, o contorno seria apenas definido por um polinómio de 3º grau, logo não correspondendo de forma precisa à intenção inicial de utilizar dois polinómios para descrever o contorno, encontrando-se completamente fora do domínio do ábaco concebido por Levin. Pode-se concluir que não existe uma segunda zona interdita para o ábaco do estreitamento hidráulico, ou apenas como uma singularidade, sobre a isolinha  $c/L=1$ . Deverá ter-se em consideração que apenas se estudou pontos do ábaco sobre a linha das ordenadas  $D_0/D=3$  e para um escoamento com uma velocidade de entrada no convergente de  $2,05$  m/s.

## Conclusões

A perda de carga nos convergentes com rácio de áreas de 9:1 é cerca de 5 vezes superior aos convergentes com rácio de 4:1, sendo que entre convergentes com o mesmo rácio de áreas varia muito pouco, menos de 0,02%.

A comparação dos convergentes com rácios de áreas de 4:1 e de 9:1 baseia-se em condições de aplicabilidade que não são de todo comparáveis. Ainda assim, os resultados sugerem que os convergentes com rácio de áreas de 9:1 apresentam um escoamento de melhor qualidade relativamente aos 4:1, segundo as métricas usadas. Os convergentes 9:1 são mais eficazes a reduzir a turbulência e a evitar a ocorrência de separação no escoamento, além de ser o formato mais sustentado pela literatura.

Os níveis de intensidade turbulenta obtidos à entrada da secção de teste foram elevados para o escoamento de um túnel aerodinâmico (cerca de 1,2% para os convergentes com rácio 9:1). Este resultado deve-se ao facto de não terem sido aplicados ainda quaisquer elementos de redução de intensidade turbulenta. Os convergentes com um rácio de áreas de 4:1 reduzem a intensidade turbulenta em cerca de 63%, enquanto que os 9:1 em cerca de 75%.

As simulações realizadas neste trabalho foram unicamente bidimensionais, permitindo recriar fielmente as condições de aplicabilidade do ábaco do estreitamento hidráulico para condutas circulares. No entanto, de forma a aplicar as conclusões obtidas acerca do convergente para o projeto do convergente do túnel aerodinâmico, de secção retangular, foi necessário considerar um método. Concluiu-se que o cálculo do diâmetro hidráulico é o melhor método a utilizar em condutas de secção retangular de forma a interpretar o ábaco do estreitamento hidráulico, aplicando diretamente as conclusões do seu estudo.

Criou-se com sucesso uma *UDF* com o objetivo de recriar as condições de escoamento verificadas com a inserção de elementos de redução de intensidade turbulenta. Dessa forma será possível ser implementada em trabalhos futuros.

Verificou-se que o limite do número de elementos da licença de estudante ANSYS® utilizada influenciou negativamente a qualidade da malha para os casos dos convergentes associados a  $c/L$  elevados, através da observação da dimensão  $y^+$  verificada ao longo da superfície dos diversos convergentes estudados. No entanto, considera-se que as malhas estão suficientemente refinadas nas zonas mais críticas e suscetíveis de ocorrer recirculações: junto às paredes do convergente, com enfoque especial entre a sua secção de entrada e o ponto de inflexão.

## 5.2 Sugestões para Trabalho Futuro

O presente trabalho contempla os estudos *CFD* iniciais do convergente, que têm como finalidade servirem de base para o projeto do túnel aerodinâmico. Deste modo, seria interessante em trabalhos futuros verificar a validade e aprofundar as conclusões obtidas relativamente à geometria do convergente. Desta forma, deve-se realizar um estudo tridimensional do escoamento do convergente a implementar no túnel aerodinâmico.

Efetando o estudo tridimensional será possível quantificar como a assimetria afeta os resultados obtidos pelo modelo em 2D, e qual a aproximação efetuado ao se considerar o diâmetro hidráulico do convergente, garantindo os resultados mais fiéis ao caso real. Nesse sentido, é aconselhado que o estudo 3D comece por comprovar os resultados obtidos para a conduta

circular do convergente, por forma a verificar os resultados obtidos, independentemente do espaço dimensional. Obter-se-á uma prova conclusiva sobre se o método de interpretação do ábaco para condutas não circulares é, de facto, considerar o diâmetro hidráulico. Será ainda possível verificar a existência de escoamentos secundários e a melhor forma de os mitigar caso ocorram. Consequentemente, será uma vantagem captar as flutuações tridimensionais presentes no escoamento.

Seria também interessante efetuar um estudo mais completo sobre o ábaco do estreitamento hidráulico, testando mais pontos deste para tentar reproduzir numericamente a fronteira da sua zona interdita, por forma a verificar se o modelo numérico continua a coincidir com os resultados obtidos experimentalmente por Levin.

Serão necessários estudos adicionais para apurar concretamente a importância das várias isolinhas assinaladas, se estas têm apenas carácter geométrico ou mais algum significado quanto à qualidade do escoamento produzido, assim como procurar evidências irrefutáveis da existência de uma segunda zona interdita para valores elevados de  $c/L$ , se são geradas recirculações.

Realizar estudos para uma gama maior de velocidades de escoamento, contemplando nestes o caudal máximo que o túnel aerodinâmico poderá debitar. As condições de funcionamento do túnel aerodinâmico são restringidas pela perda de carga do elemento de redução de intensidade turbulenta a aplicar. Dever-se-á, dessa forma, determinar com precisão o caudal de funcionamento do túnel aerodinâmico recorrendo às curvas de funcionamento do ventilador. Assim será possível determinar a pressão associada à instalação e o caudal do mesmo. Estudar a influência de diferentes gamas de velocidades na escolha do melhor contorno.

Dever-se-á estudar as melhores relações geométricas para o divergente do túnel aerodinâmico: o ângulo de inclinação das paredes do difusor em relação ao eixo axial, relativo ao lado de maior abertura e o raio do boleado na secção de entrada, sendo este último opcional – representado nos projetos do túnel aerodinâmico das Figura 7.29 e 7.30. Estes devem ser dimensionados de forma a permitir aumentar o diâmetro da conduta no menor comprimento axial possível, sem introduzir com isso demasiada turbulência no escoamento médio.

Para isso deve-se modelar por completo o túnel aerodinâmico, dando continuidade ao trabalho iniciado com a programação da *UDF*, com a finalidade de recriar a perda de carga associada à existência de elementos de diminuição de intensidade turbulenta do escoamento, a ser implementados na câmara de tranquilização. Pretende-se quantificar a queda de carga por forma a que o escoamento no interior do divergente adira às suas paredes, de modo a não criar neste uma bolha de recirculação com dimensões apreciáveis, e simultaneamente que a perda de pressão introduzida no escoamento seja a menor possível.

Determinar qual ou quais os elementos de redução de intensidade turbulenta a utilizar – redes e «favos de abelha» – e qual a sua opacidade. Relacionar a sua seleção e dimensionamento com o valor da perda de carga necessária a adicionar ao escoamento determinada através da implementação da *UDF*. O seu dimensionamento deve ser tal que permita reduzir eficazmente os turbilhões presentes no escoamento médio.

## Conclusões

Recorrer nos estudos futuros, se possível, a malhas com maior número de elementos (mais de 512 000), produzindo malhas mais refinadas junto às paredes dos constituintes – nomeadamente do convergente, o que permitirá efetuar simulações onde os valores de  $y^+$  não ultrapassem o valor unitário ao longo de toda a superfície do convergente e restantes constituintes, considerada como boa prática em estudos similares, presentes na literatura. Verificar, dessa forma, a influência do refinamento da malha em toda a extensão do domínio do túnel, para valores de  $y^+$  inferiores a 1, na qualidade dos resultados computacionais obtidos. A necessidade de conceber malhas com mais elementos disponíveis é realçada pela inevitabilidade de se realizarem estudos tridimensionais do escoamento, utilizando-se os resultados 2D deste trabalho para orientar o estudo futuro.

O estudo *CFD* foi utilizado como ferramenta de apoio ao projeto, no entanto, é de admitir que exista algum desvio ao caso real. Deste modo, será interessante, aquando da realização do túnel aerodinâmico, efetuar medições experimentais da CL e das pressões para comparar com resultados numéricos apresentados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allan, B. (2008). NASA's Wind Tunnels. Nasa. Obtido Janeiro 24, 2016, de <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/WindTunnel.html>

Bell, J. H., e Mehta, R. D. (1988). Contraction design for small low-speed wind tunnels. NASA CR-182747.

Bell, J. H., e Mehta, R. D. (1989). Boundary-Layer Predictions for Small Low-Speed Contractions. AIAA, 27(3), 372–374.

Brusca, S., Lanzafame, R., e Messina, M. (2011). Low-speed wind tunnel: design and build. Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments, 189–220.

Cattafesta, L., Bahr, C., e Mathew, J. (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. Encyclopedia of Aerospace Engineering, 1–10.

Cermak, J. E. (2003). Wind-tunnel Development and Trends in Applications to Civil Engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91(3), 355–370.

Cermak, J. E., e Cochran, L. S. (1992). Physical modelling of the atmospheric surface layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 42(1–3), 935–946.

Costa, D. D. (2015). Proposal of a methodology for the design of the installation of turrets on aircrafts – the approach on the aerodynamic influences. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Daud, H. A., Li, Q., Beg, O. A., e AbdulGhani, S. A. A. (2011). Numerical investigations of wall-bounded turbulence. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 225(5), 1163–1174.

Derbunovich, G. I., Zenskaya, A. S., Repik, E. U., e Sosedko, Y. P. (1987). Effect of Flow Contraction on the Level of Turbulence, (2), 146–152.

Hansen, S. O., e Sørensen, E. G. (1985). A new boundary-layer wind tunnel at the Danish Maritime Institute. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 18(2), 213–224.

## Bibliografia

Lastra, M. R., Oro, J. M. F., Vega, M. G., Marigorta, E. B., e Morros, C. S. (2013). Novel design and experimental validation of a contraction nozzle for aerodynamic measurements in a subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118, 35–43. Elsevier.

LEAP Australia Pty Ltd. (2012). Tips e Tricks: Inflation Layer Meshing in ANSYS. Obtido Março 17, 2016, de <http://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>

Leifsson, L., e Koziel, S. (2015). Simulation-driven design of low-speed wind tunnel contraction. *Journal of Computational Science*, 7, 1–12. Elsevier B.V.

Levin, L. (1968). *Formulaire Des Conduites Forcées, Oléoducs Et Conduits D' Aération*. Paris: Dunod.

Mathew, J., Bahr, C., Carroll, B., Sheplak, M., e Cattafesta, L. (2005). Design, Fabrication, and Characterization of an Anechoic Wind Tunnel Facility. 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University of Florida, AIAA.

Max-Planck-Gesellschaft. (2016). History. Obtido Janeiro 24, 2016, de <http://www.ds.mpg.de/81243/hist>

Mehta, R. D., e Bradshaw, P. (1979). Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels. *Aeronautical Journal*, 83(827), 443–449.

Meroney, R. N., Leitl, B. M., Rafailidis, S., e Schatzmann, M. (1999). Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 333–345.

Moonen, P., Blocken, B., Roels, S., e Carmeliet, J. (2006). Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(10), 699–723.

Morel, T. (1975). Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions. *Journal of Fluids Engineering*, 97, 225–233.

Morel, T. (1977). Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions. *Journal of Fluid Engineering*, 99(2), 371–377.

Niemann, H. J. (1993). The boundary layer wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 48(2–3), 145–161.

Prandtl, L. (1933). Attaining a steady air stream in wind tunnels. NACA TM 726.

Ramaseshan, S., e Ramaswamy, M. A. (2002). A Rational Method to Choose Optimum Design for Two-Dimensional Contractions. *Journal of Fluids Engineering*, 124(2), 544–546.

Roque, F. M. G., e Mendes, A. C. (2012). Simulação computacional da aerodinâmica de um túnel de vento de baixa velocidade. *Conferência ICE UBI 2012* (pp. 1–10).

Schatzmann, M., Donat, J., Hendel, S., e Krishan, G. (1995). Design of a low-cost stratified boundary-layer wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54–55, 483–491.



Stathopoulos, T. (1984). Design and fabrication of a wind tunnel for building aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16(2–3), 361–376.

Vaz, D. C., Almeida, R. A. B., Didier, E., Urgueira, A. P. V, e Borges, A. R. J. (2016). Improving the aerodynamic performance of Vila-Real Bridge deck-section. *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156, 72–83. Elsevier.

Wind Engineering. (2012). 100 years: The Gustav Eiffel Wind Tunnel. Obtido Janeiro 24, 2016, de <http://www.windengineering.org/100-year-anniversary-the-gustav-eiffel-wind-tunnel/>

Wright Brothers. (2010). Wright Photos. Obtido Janeiro 24, 2016, de [http://www.wright-brothers.org/Information\\_Desk/Help\\_with\\_Homework/Wright\\_Photos/Wright\\_Photos.htm](http://www.wright-brothers.org/Information_Desk/Help_with_Homework/Wright_Photos/Wright_Photos.htm)

## **Outra bibliografia consultada**

ANSYS Fluent UDF Manual. (2013). ANSYS Inc. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.

Cebeci, T. (2004). *Analysis of Turbulent Flows - Second Revised and Expanded Edition* (2nd ed.). Elsevier.

Fluent. (2011). ver. 14.0, ANSYS Inc. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.

Fluent Theory Guide. (2011). ver. 14.0, ANSYS Inc. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.

Mohammadi, B., e Pironneau, O. (1994). *Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model*. (Wiley & Masson, Eds.). Paris: John Wiley & Sons: Masson.

Tennekes, H., e Lumley, J. L. (2010). *Turbulência em Fluidos*. (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.). Lisboa.

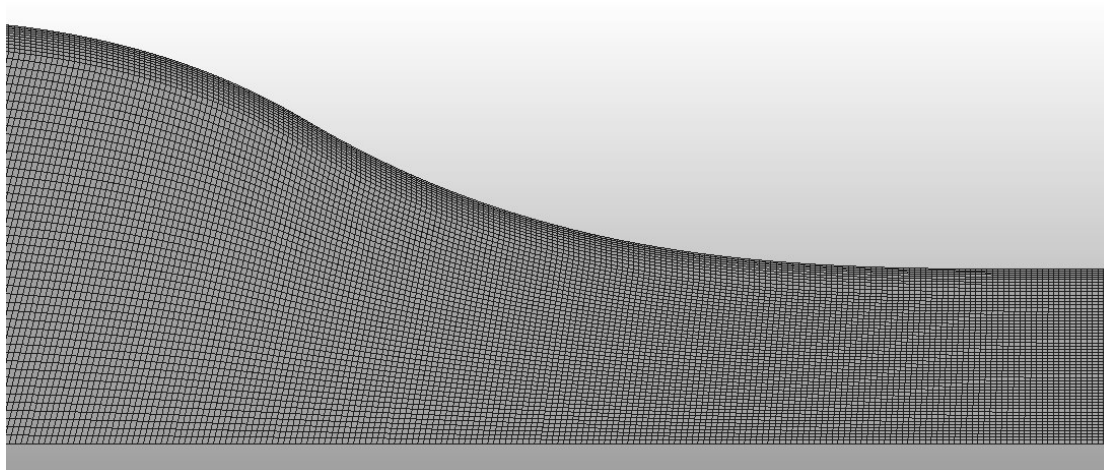
White, F. M. (2011). *Mecânica dos Fluidos* (6.<sup>a</sup> ed.). AMGH Editora.



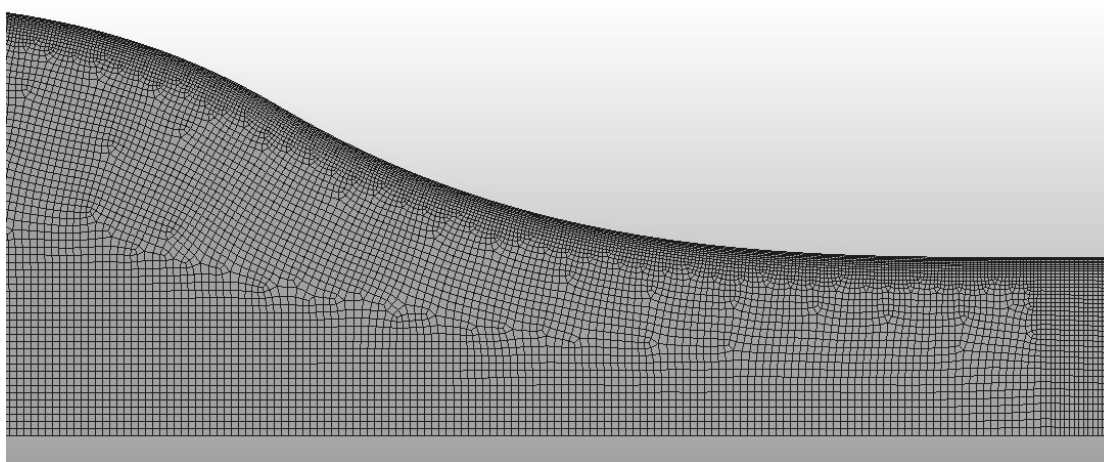
# APÊNDICES

Neste capítulo apresentam-se gráficos, representações e desenhos que complementam informações introduzidas ao longo dos capítulos anteriores, sendo os seus temas os seguintes:

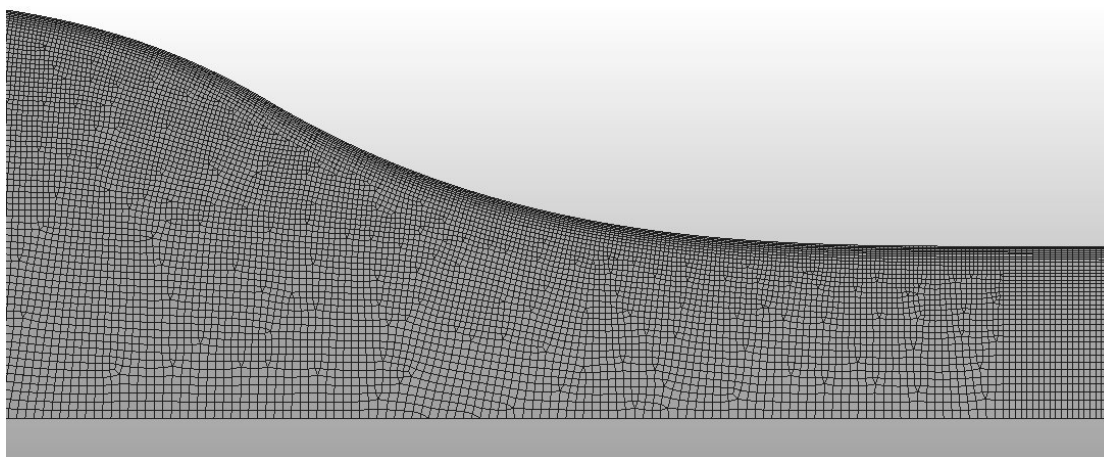
- Diferentes tipos de discretização possíveis para o volume interior do convergente através dos diversos métodos automáticos de geração de malha;
- Malhas de discretização menos conseguidas;
- Malha de discretização empregue no estudo;
- A localização dos pontos estudados do ábaco de Levin;
- Perfis de velocidades de dois convergentes analisados nas diversas secções estudadas;
- Estudo de independência da malha: gráficos para os parâmetros  $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$ , valor de  $y^+$  no ponto de inflexão do contorno e a razão entre a intensidade turbulenta verificada na secção de saída e na de entrada;
- Espessuras de CL obtidas para os convergentes  $D_0/D=3$  estudados;
- Perdas de carga e intensidades turbulentas obtidas para os pontos do ábaco estudados;
- As linhas de corrente obtidas no caso  $c/L=0,99$  e uma contração brusca;
- Os códigos utilizados para a programação das *UDF*;
- Metodologia empregue na determinação das espessuras da camada limite;
- Os desenhos do projeto do túnel aerodinâmico resultantes do estudo deste trabalho.



a)

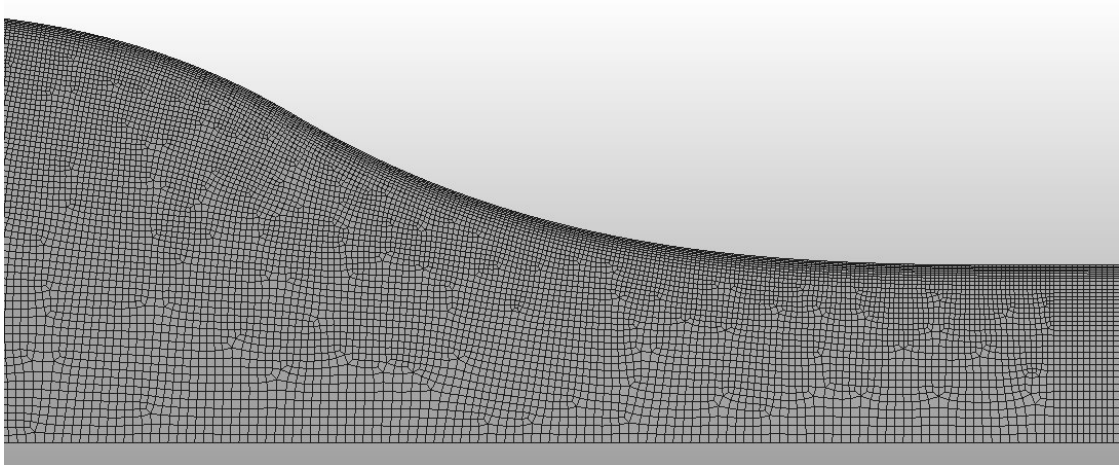


b)

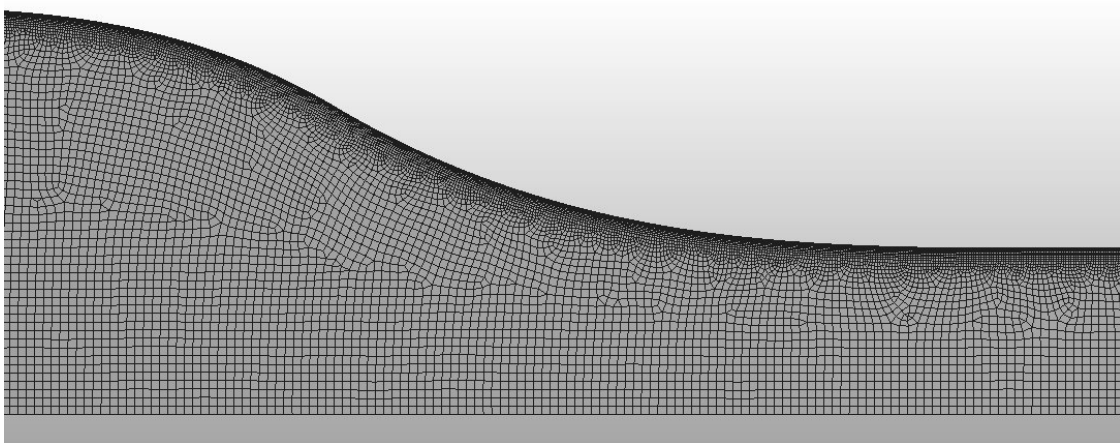


c)

**Figura 7.1 – Discretização da malha do convergente através de diferentes métodos automáticos:  
a) *Face Meshing* (Map); b) *Multizone Pave* (all quad); c) *Multizone Uniform* (Quad/Tri)**



a)

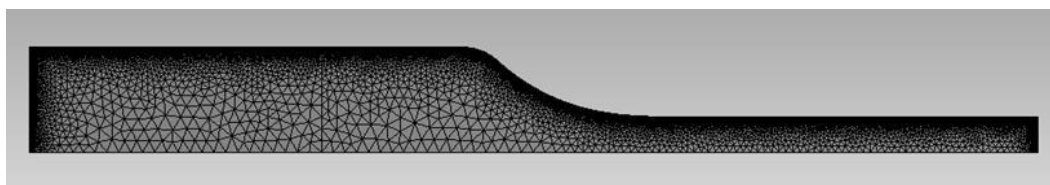


b)

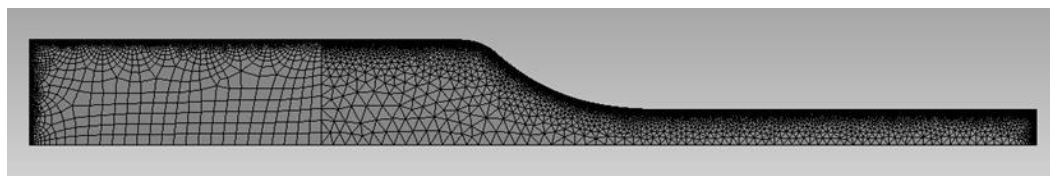
**Figura 7.2 – Discretização da malha do convergente através de diferentes métodos automáticos:**  
**a) *Multizone Uniform* (all quad)<sup>8</sup>; b) *Quadrilateral Dominant* (Quad/Tri)**

---

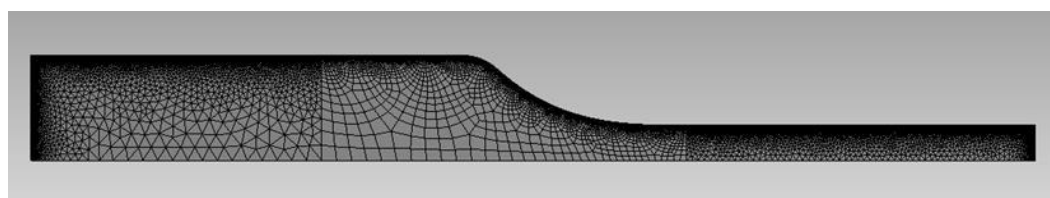
<sup>8</sup> As malhas de discretização apresentadas não estão otimizadas de acordo com as boas práticas: a malha junto à superfície do contorno está demasiado grosseira enquanto a malha sobre o escoamento médio, nas proximidades do eixo de simetria, encontra-se demasiado refinada. As discretizações apresentadas constituem apenas uma indicação do tipo de malha criada através dos diversos métodos automáticos de geração de malha.



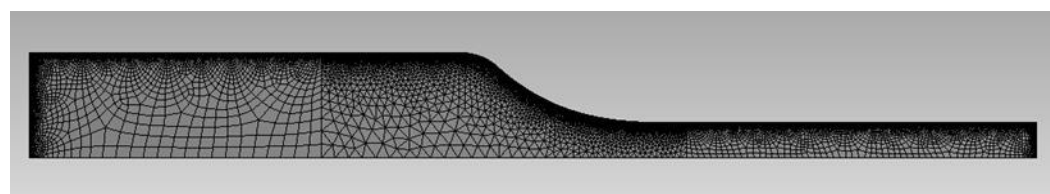
a)



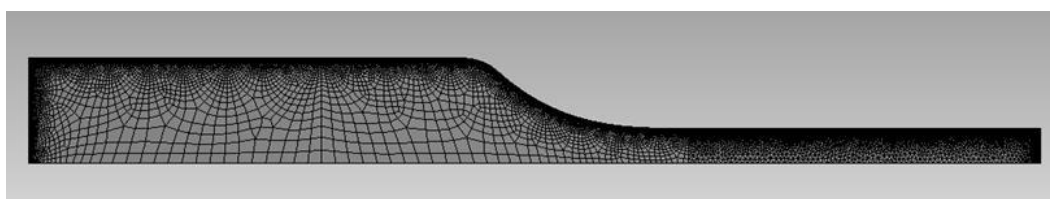
b)



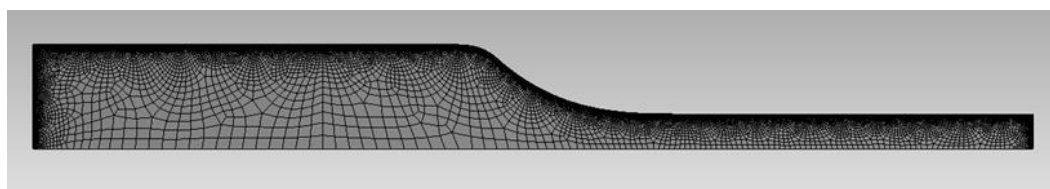
c)



d)



e)



f)

**Figura 7.3 – Malhas menos conseguidas (de a) e e)) e a otimizada (f), relativas ao convergente  $c/L=0,20$  e  $D_0/D=3$ , de secções de entrada e de saída de 1200 e 400 mm respectivamente e comprimento de 1350 mm**

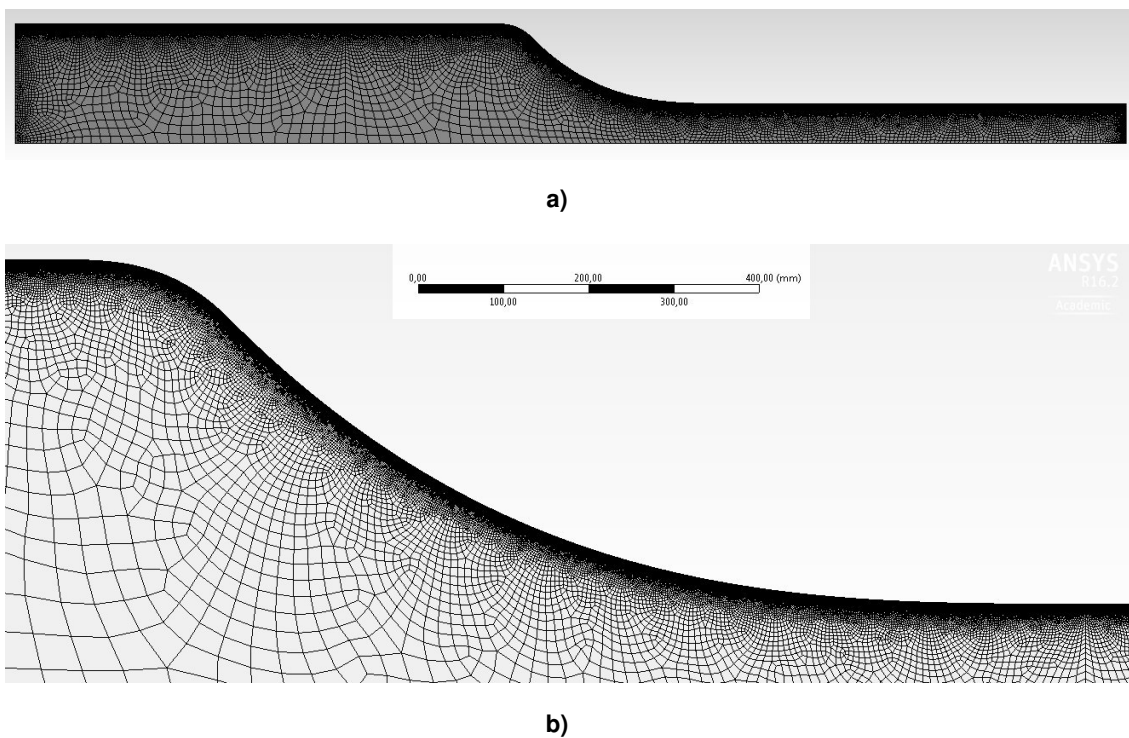


Figura 7.4 – Malha de discretização empregue no estudo *CFD*: a) domínio computacional; b) ampliação da superfície do convergente (exemplo referente ao convergente 9:1,  $c/L=0,17$ ).

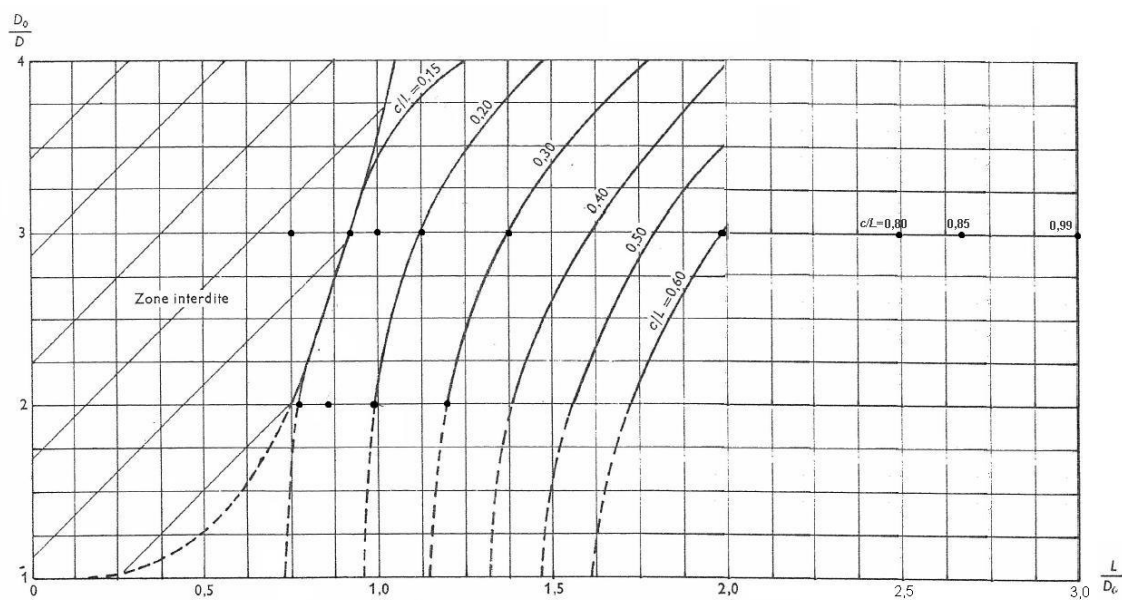
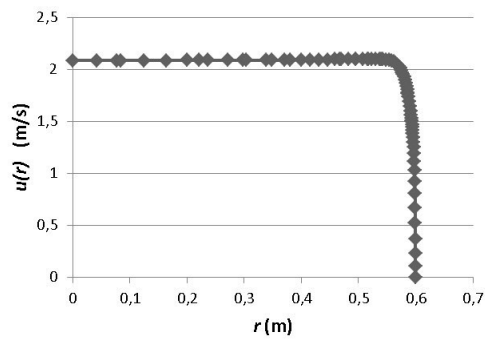
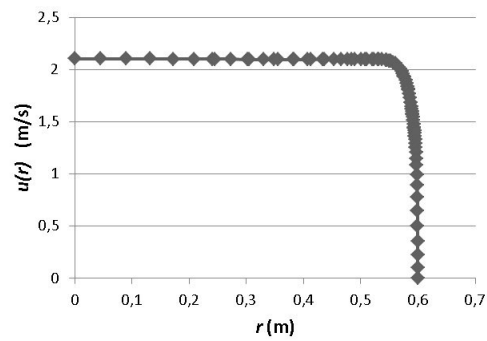


Figura 7.5 – Pontos do ábaco estudados para malha com espessura  $h$  de 0,15 mm [adaptado de Levin, 1968]

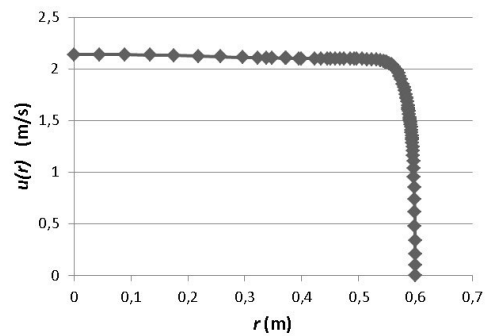
## Perfis de velocidades típicos para cada secção do convergente



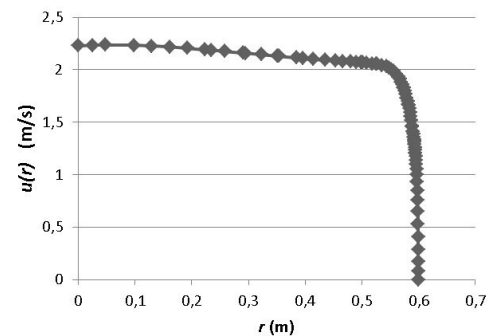
**Figura 7.6 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S1. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



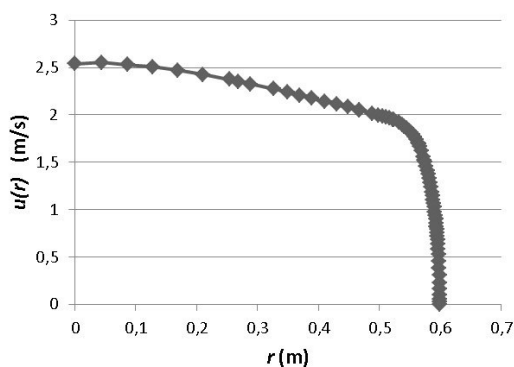
**Figura 7.7 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S2. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



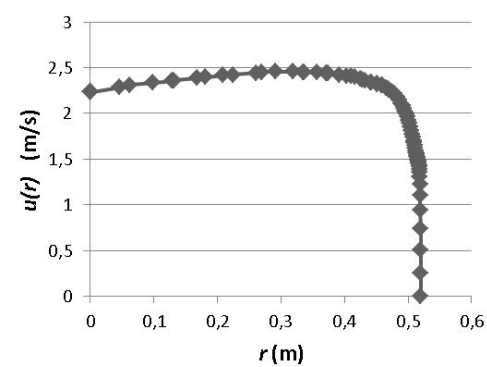
**Figura 7.8 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S3. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



**Figura 7.9 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S4. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**

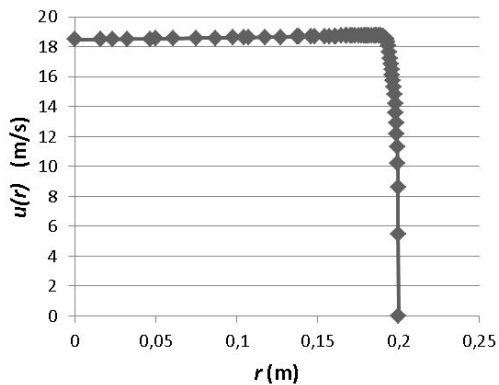


**Figura 7.10 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S5. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**

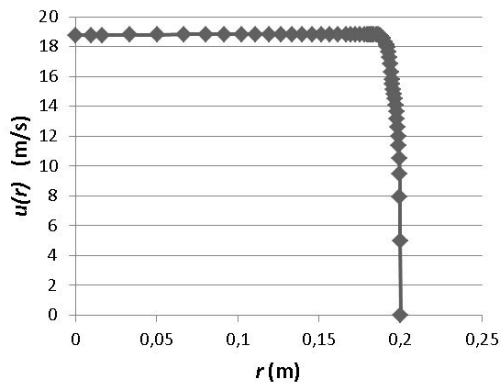


**Figura 7.11 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S6. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**

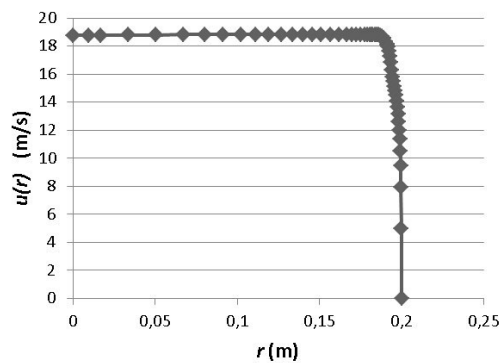




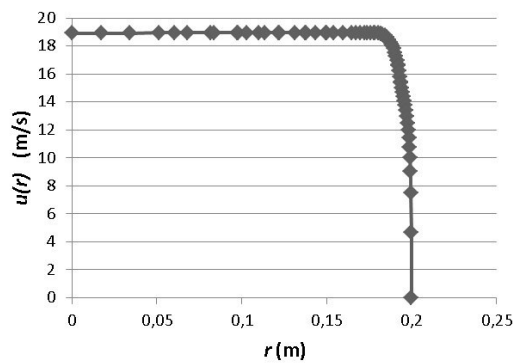
**Figura 7.12 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S7. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



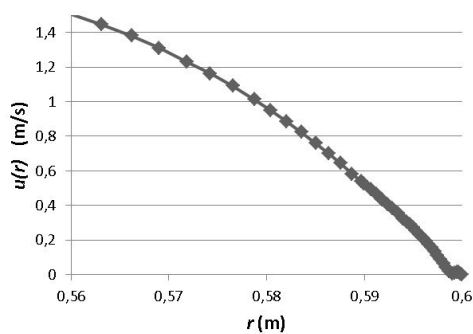
**Figura 7.13 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S8. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



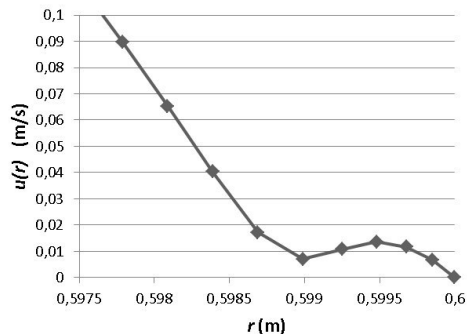
**Figura 7.14 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S9. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



**Figura 7.15 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,20$ : secção S10. Velocidade do escoamento em função do raio da conduta.**



a)



b)

**Figura 7.16 – Perfil de velocidades do convergente  $D_0/D=3$ ,  $c/L=0,15$ , secção S5, indica tendência de possíveis recirculações no perfil junto da parede.**

## Estudo de independência da malha ( $c/L=0,20$ )

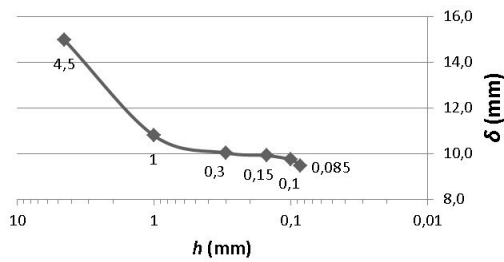


Figura 7.17 – Valores de delta em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente

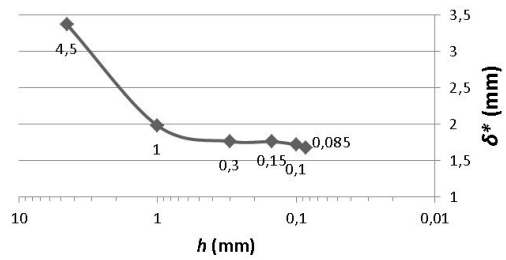


Figura 7.18 – Valores de delta\* em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente

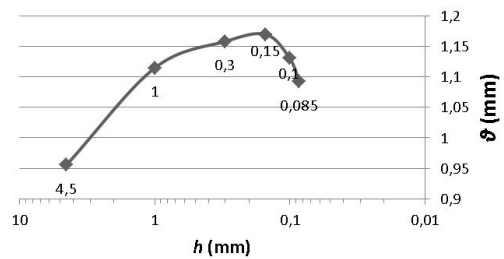


Figura 7.19 – Valores de theta em função da espessura das células adjacentes à parede do convergente

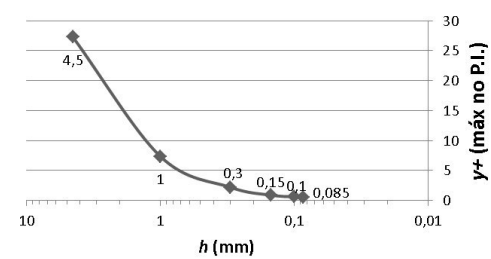


Figura 7.20 – Valores máximos de  $y^+$  no P.I. do contorno em função da espessura  $h$

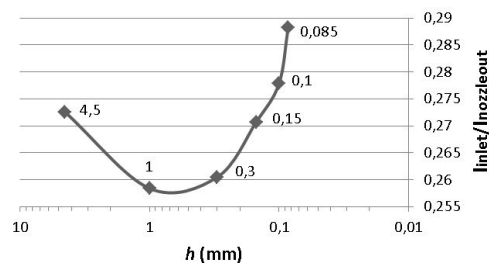


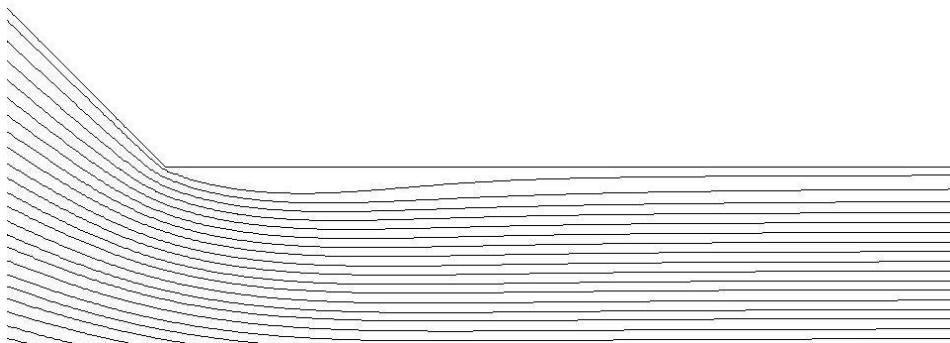
Figura 7.21 – Razão entre a intensidade turbulenta à entrada e à saída do convergente, em função da espessura da malha junto à parede do convergente

**Tabela 7.1 – Espessura da camada limite para convergentes  $D_0/D=3$**

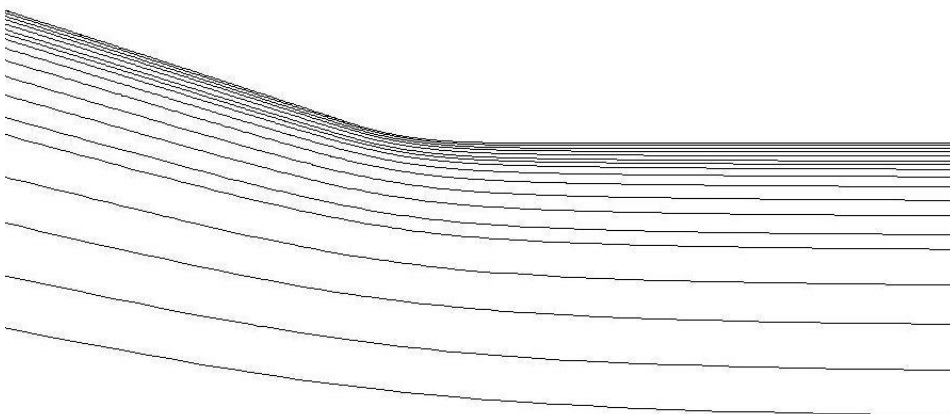
$c/L$	$\delta (x/L) [mm]$									
	-0,667	-0,444	-0,296	-0,148	0	$c/L$	0,926	1	1,07	1,30
0,11	62,8	65,9	76,8	68,5	86,0	57,9	11,0	18,5	20,7	23,8
0,15	53,4	61,8	78,3	65,6	78,6	103	12,4	15,7	16,3	22,0
0,17	56,5	57,1	65,5	75,6	161	157	12,6	25,3	35,8	22,1
0,20	46,4	55,6	68,6	64,2	152	110	12,3	24,0	19,1	23,9
0,30	39,5	55,6	60,7	58,4	61,7	97,7	14,3	42,0	23,1	27,3
0,60	31,5	51,0	59,1	67,8	80,9	33,9	12,4	18,9	21,1	32,8
0,80	19,3	40,0	56,5	56,2	72,0	72,8	10,2	23,7	17,9	33,8
0,85	31,5	40,3	64,5	53,9	62,7	11,9	8,98	21,3	22,6	32,8
0,99	-	31,1	48,8	62,8	65,7	3,80	24,2	7,43	22,2	31,3

**Tabela 7.2 – Perda de carga e variação da intensidade turbulenta entre as secções de entrada e de saída dos convergentes**

$c/L$	Perda de carga (Pa)		Intensidade turbulenta					
	4:1	9:1	4:1			9:1		
			$I_{turb(E)} (\%)$	$I_{turb(S)} (\%)$	$I_{turb(S)}/I_{turb(E)}$	$I_{turb(E)} (\%)$	$I_{turb(S)} (\%)$	$I_{turb(S)}/I_{turb(E)}$
0,11	-	211,0	-	-	-	4,774	1,181	0,2475
0,15	39,33	212,0	4,612	1,684	0,3652	4,612	1,219	0,2643
0,17	39,49	212,4	4,559	1,687	0,3701	4,572	1,206	0,2639
0,20	39,68	213,0	4,479	1,679	0,3749	4,502	1,219	0,2707
0,30	39,85	213,7	4,377	1,665	0,3805	4,381	1,236	0,2820
0,60	-	213,7	-	-	-	4,333	1,186	0,2737
0,80	-	212,6	-	-	-	4,332	1,084	0,2502
0,85	-	212,2	-	-	-	4,324	1,039	0,2402
0,99	-	209,6	-	-	-	4,329	0,8675	0,2004



**Figura 7.22 – Linhas de corrente numa conduta com contração brusca, mostrando o efeito de uma *vena contracta*.**



**Figura 7.23 – Linhas de corrente ampliadas na zona da secção final do converge  $c/L=0,99$ , mostrando que não existe afastamento das linhas de corrente da parede.**

### Programação das UDF:

```
#include "udf.h"

DEFINE_ADJUST(queda_pressao,d)
{
    real press, vel, Pf;

    real deltaP,rho;

    int zone_ID = 14;

    FILE * fp1;

    Thread *tTunel = Lookup_Thread(d,zone_ID);

    Thread * tTunel0, * tTunel1;

    cell_t c, c0, c1;

    int i=1;

    tTunel0 = THREAD_T0(tTunel);
    tTunel1 = THREAD_T1(tTunel);

    fp1 = fopen("VALORES_pressao_1.txt","w");

    begin_f_loop(zone_ID, tTunel)
    {
        c0 = F_C0(zone_ID, tTunel);

        press=C_P (c0, tTunel0);

        vel=C_U (c0, tTunel0);

        rho=C_R (c0, tTunel0);

        deltaP = 0.1*(0.5*rho*vel*vel);

        c1 = F_C1(zone_ID, tTunel);

        Pf=(press-deltaP);

        C_P(c1, tTunel1) = Pf;

        fprintf (fp1, "pressao_final: %lf\n",Pf );

    }

    end_f_loop(zone_ID, tTunel)

    fclose (fp1);

}
```

**Figura 7.24 – UDF implementada sem sucesso: recorre à macros DEFINE\_ADJUST**

```
#include "udf.h"

#define Qsi 100.0

DEFINE_SOURCE(perda_carga, c, t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];

    real Rho, vel2, deltaP, source;

    C_CENTROID(x, c, t);

    Rho = C_R(c, t);

    vel2 = C_U(c, t)*C_U(c, t);

    // velocidade segundo x: C_U(c,t)

    deltaP = -0.5 * Rho * vel2 * Qsi;

    source = deltaP;

    dS[eqn] = -2.*0.5*Rho*C_U(c, t)*Qsi;

    return source;

}
```

**Figura 7.25 – UDF implementada com sucesso: recorre à macros DEFINE\_SOURCE<sup>2</sup>**

**Tabela 7.3 – Descrição das *UDF***

<b>DEFINE_ADJUST</b>	<b>DEFINE_SOURCE</b>
<p>Esta <i>UDF</i> começa por definir como reais a variáveis necessárias à sua implementação.</p> <p>Define o endereço da zona ID (de acordo com o FLUENT) relativo à linha da rede, que separa o domínio que funcionará como secção de redução da pressão do escoamento que a atravessa.</p> <p>Chama o ponteiro das células adjacentes à linha da rede, especificando se são a montante ou a jusante.</p> <p>Cria um documento de texto de modo para registar a pressão que se verifica nas células a jusante da linha da rede.</p> <p>Corre um ciclo em que se lê o valor da pressão, da velocidade e da massa volúmica do fluido na célula adjacente à linha da rede, a montante, no centro da face coincidente com a linha. Calcula a queda de pressão e implementa o valor de pressão a afetar no centro da face da célula adjacente à linha da rede. Atualiza os valores de pressão nas células a jusante da linha da rede.</p>	<p>Define o valor do coeficiente da perda de carga.</p> <p>Cria uma matriz para contemplar as informações dos centróides das células pertencentes ao meio poroso definido.</p> <p>Define como reais a variáveis necessárias para a implementação da <i>UDF</i>.</p> <p>Calcula o centróide das células da zona em que o meio poroso é aplicado.</p> <p>Determina a massa volúmica e o quadrado da velocidade do escoamento à entrada da zona «definida» como porosa.</p> <p>Calcula e define a equação que permite determinar a perda de carga aplicada ao escoamento.</p>

---

<sup>2</sup> O valor de  $Q_{si}$  não é determinístico, deve ainda ser apurado qual o melhor valor para a presente situação; o nome atribuído à *UDF* e pelo qual é reconhecida no *Fluent* é indiferente, neste exemplo foi apelidada de “perda\_carga”.

## Determinação das espessuras da camada limite

A partir dos resultados *CFD* obtiveram-se perfis de velocidade nas secções de leitura descritas na Tabela 3.3, sendo estes planos transversais ao escoamento. Expõe-se, nas subsecções seguintes, a metodologia utilizada para a determinação dos valores da espessura de CL, a espessura de deslocamento, a espessura de quantidade de movimento e o fator de forma do perfil de velocidades ( $\delta$ ,  $\delta^*$ ,  $\theta$  e  $H$ ).

As faces das células da malha, na vizinhança dos planos onde se obtiveram os perfis de velocidade, não são perfeitamente coincidentes com estes. Assim, as interpolações necessárias à obtenção de valores no plano onde se pretende obter o perfil de velocidade, levam a que os perfis exibam algum ruído (Figura 7.16 b), de maior ou menor expressão consoante a dimensão das células e desvio ao plano de leitura. Antes de aplicar os métodos para obtenção dos indicadores de espessura de CL anteriormente referidos, os perfis foram alisados com uma média corrida de 5 pontos.

### Perfil de velocidades

Para a obtenção de valores mais precisos de  $\delta$  realiza-se o «alisamento» dos de perfis de velocidade através da aplicação de médias corridas de 5 pontos. O método tem em consideração os valores da velocidade verificados no próprio nó ( $u_i$ ), assim como nos quatro nós adjacentes a este ( $u_{i-2}$ ,  $u_{i-1}$ ,  $u_i$ ,  $u_{i+1}$  e  $u_{i+2}$ ), tal como indicado pela representação da Figura 7.26. O grau de influência de cada nó sobre o valor do nó intermédio  $u_i$  (o peso  $\alpha_{i\pm n}$ ) depende das distâncias dos nós em relação a este último ( $\Delta r_{i\pm n}$ ).

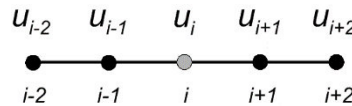


Figura 7.26 – *Stencil* usado na média corrida de cinco pontos

Através da seguinte expressão:

$$u_i^* = \frac{\alpha_{i-2} \times u_{i-2} + \alpha_{i-1} \times u_{i-1} + \alpha_i \times u_i + \alpha_{i+1} \times u_{i+1} + \alpha_{i+2} \times u_{i+2}}{\alpha_{i-2} + \alpha_{i-1} + \alpha_i + \alpha_{i+1} + \alpha_{i+2}} \quad (7.1)$$

Em que a expressão que atribui o peso ao valor da velocidade de cada nó ( $\alpha_{i\pm n}$ ) é inversamente proporcional à distância entre nós,  $\Delta r_{i\pm n}$ , que não tem de ser constante, sendo definida da seguinte forma:

$$\alpha_{i\pm n} = \frac{1}{1 + c_1 \times |\Delta r_{i\pm n}|} \quad (7.2)$$

Onde  $\Delta r_{i\pm n}$  consiste na distância entre os nós  $i$  e  $i \pm n$ . O coeficiente  $c_1$  é um fator de escala. Verificou-se empiricamente que um valor de  $c_1$  igual a 1000 apresenta os melhores resultados para uma determinação da espessura da CL.

***Determinação da espessura da CL: ângulo entre segmentos de reta do perfil de velocidades***

Após se proceder ao «alisamento» dos nós do perfil de velocidades é necessário determinar a espessura da CL. O critério utilizado na teoria da placa plana para a sua determinação, como descrito no capítulo 2.1.5.1, consiste em considerar como valor de  $\delta$  a espessura do escoamento cuja a sua velocidade é inferior ou igual a 99% da velocidade do escoamento livre. Este critério destina-se a escoamentos exteriores sobre placas planas. Para escoamentos interiores em condutas não se verifica um critério robusto, como inadequado.

No caso do convergente, com a variação da secção da conduta circular, com a diminuição da secção de passagem o escoamento acelera na zona central da conduta, ao invés de se manter inalterado como sobre uma placa plana. Desta forma, antes de o perfil de velocidades se desenvolver, a velocidade do fluido que se encontra na fronteira da CL chega a ser de cerca de 60% em relação à velocidade do escoamento junto ao eixo axial, que apresenta a maior magnitude de velocidade – valores baseados no perfil da secção S5, do caso da Figura 7.10, onde é possível observar um perfil tampão. Esta diferença é maior quanto menor o comprimento do convergente. Consequentemente, ao invés de o perfil apresentar-se uniforme na zona central do convergente, o declive do perfil de velocidades, devido à interação com as paredes do convergente, irá manter-se considerável até uma região mais próxima do eixo de simetria do convergente.

É necessário criar um método alternativo e robusto para a determinação da espessura da CL. Esta é caracterizada por conter a região do escoamento onde os efeitos viscosos são predominantes, devido à interação entre o escoamento e a parede, sendo a espessura da CL caracterizada pelo valor de  $\delta$ . Fora da camada limite existe predominância dos efeitos de inércia. Isto significa que fora da CL o perfil de velocidades é maioritariamente uniforme, enquanto no interior a variação das velocidades é mais elevada. Este facto é utilizado para a criação do método de determinação de  $\delta$ .

Considera-se que o que define a existência da CL é a grande variação de velocidades entre o escoamento onde as forças viscosas são dominantes – próximo da parede sólida – e o escoamento onde as velocidades são mais constantes, onde as forças de inércia são predominantes. Toma-se como critério para a determinação da espessura da CL, o nó onde ocorrer a máxima variação de velocidade que ocorrer no perfil de velocidades. O valor de  $\delta$  será a distância do nó à parede do convergente onde se verificar a maior variação de velocidade no perfil.

Uma forma de estudar a variação do perfil de velocidades seria através da derivada do perfil de velocidades. Essa seria possível através das diferenças finitas centrais de 2.<sup>a</sup> ordem, pretendendo-se determinar o valor de  $\delta$  como o raio da conduta ( $r$ ) onde a 1.<sup>a</sup> derivada variaria a um ritmo máximo. No entanto o importante a determinar não é o valor da derivada, que em todos os casos irá variar entre zero e  $\infty$ , mas sim a taxa a que o perfil de velocidades está a variar. Nesse sentido a determinação de  $\delta$  pela derivada envolveria alguma dificuldade, pois ter-se-ia que fazer uma transformação de coordenadas para criar uma coordenada  $s$  sempre alinhada com o perfil em cada nó a estudar.

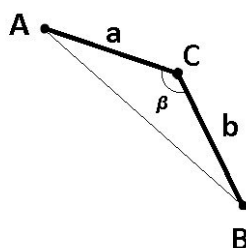
Assim é necessário construir um método robusto que permita determinar a espessura da CL de acordo com o perfil de velocidades apresentado nas diversas secções de leitura. Visto



que o que se procura é a taxa de variação do perfil de velocidades e que já se possuem os seus valores discretizados, o método implementado consiste em considerar os segmentos de reta formados pelos valores de velocidades nos nós. Determina-se o ângulo que é efetuado entre segmentos de reta adjacentes (ângulo  $\beta$  da Figura 7.27). Finalmente identifica-se o valor do raio da conduta ( $r$ ) para qual o menor ângulo  $\beta$  é verificado em todo o perfil. Esse valor de  $r$  será admitido como o valor de  $\delta$ . Tem como vantagem acompanhar permanentemente o sentido do contorno.

Este método consiste assim na medição do ângulo  $\beta$  entre os segmentos de reta consecutivos que interligam os pontos sucessivos que constituem o perfil de velocidades. É possível identificar os segmentos de reta a que nos referimos entre os valores dos nós, nos casos dos perfis de velocidades apresentados nas páginas 4 e 4. O ângulo  $\beta$  é calculado a partir dos declives dos segmentos de reta. É importante que se compare sempre o ângulo formado pela parte de baixo dos segmentos de reta (concavidade para baixo), de modo a se efetuar uma comparação equitativa.

A Figura 7.27 representa dois segmentos de reta, genéricos, formados a partir dos valores de velocidade em três pontos consecutivos do perfil de velocidades – A, C e B. Os primeiros dois pontos formam o segmento de reta a, enquanto os dois últimos o segmento b, considerando-se o declive dos segmentos de reta como sendo  $m_a$  e  $m_b$  respetivamente. Pretende-se determinar o valor do ângulo  $\beta$  representado. O ângulo que se pretende medir é sempre o formado do lado inferior dos catetos, do triângulo constituído pelos segmentos de reta.



**Figura 7.27 – Representação de dois segmentos de reta consecutivos do perfil de velocidades, formando o ângulo  $\beta$  entre si.**

De notar que o ângulo que se pretende determinar verifica ser o maior ângulo formado entre os segmentos de reta, tal como o representado na Figura 7.27. Assim, desde que isso se verifique, o modo de cálculo do ângulo  $\beta$  é independente da concavidade apresentada pelos segmentos de reta. Não obstante, para a determinação do valor de  $\delta$  consideram-se apenas os pares de segmentos de reta que formam uma concavidade voltada para baixo – sendo este critério utilizado como forma de «despiste» de possíveis erros na determinação do menor valor de  $\beta$ .

A equação 7.3 apresenta a forma de cálculo do ângulo entre duas retas, conhecendo-se os seus declives, sendo que se pretende o ângulo obtuso formado entre elas, como apresentado na Figura 7.27.

$$\beta = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{m_b - m_a}{1 + m_b \times m_a} \quad (7.3)$$

A expressão para o cálculo do ângulo  $\beta$  é formada por dois termos. O segundo devolve o menor ângulo entre dois segmentos de reta (a e b). Desta forma, como se pretende o maior ângulo formado pelos segmentos de reta, com concavidade para baixo, é necessário adicionar  $180^\circ$  para a obtenção do ângulo obtuso – motivo da existência do 1.º termo. Caso contrário, se o ângulo que procurasse-mos fosse agudo, a expressão não conteria este termo.

Não obstante, a determinação de  $\delta$  a partir do cálculo do ângulo mínimo entre segmentos de reta pode apresentar dificuldades: no caso das velocidades nos nós do perfil se apresentarem bastantes irregulares ou com erros de leitura, pelo que é necessário verificar se o ângulo formado é obtuso – caso contrário a equação 7.3 tem de ser retificada. No entanto, devido à elevada densidade de nós no perfil de velocidades junto da parede e ser aplicada a média corrida de 5 pontos, os perfis apresentam-se «bem comportados» em termos de monotonia (nunca se verificou necessário proceder a correções da equação 7.3).

Com a finalidade de não «despistar» o cálculo dos ângulos  $\beta$  não foi analisado todo o raio das condutas em estudo. Pelo facto de a malha ser mais grosseira junto ao eixo da conduta, obtiveram-se menos valores para o perfil de velocidades nessa região. Nesse sentido, como é possível observar nos perfis de velocidades das várias secções ao longo do convergente, apresentados nas páginas 4 e 4, os 2/3 iniciais do raio da conduta possuem muito menos pontos e mais espaçados, podendo existir mais facilmente variações abruptas do ângulo  $\beta$  verificado entre segmentos de reta sucessivos.

Os casos mais críticos na obtenção de um valor mínimo de  $\beta$  errado surgem nos perfis de velocidades que o apresentam uma zona de perfil tampão: onde se verifica uma variação considerável da velocidade entre nós adjacentes, encontrando-se estes bastante afastados entre si. A variação da inclinação dos segmentos de reta é mais acentuada, sem traduzir o real fenómeno que pretendemos captar, devido à baixa resolução dos dados na zona central da conduta, com o objetivo de poupança de elementos.

Por vezes os valores de  $\beta$  verificados no centro da conduta são desproporcionadamente inferiores comparativamente aos obtidos no último terço de  $r$ , junto à superfície do convergente (região onde se encontra a CL). Isto origina uma identificação incorreta do valor de  $r$  onde se verifica o final da CL, devido à grande diferença da densidade da malha computacional e resolução dos dados que constituem o perfil de velocidades. Apesar de esta situação ser verificada apenas em casos pontuais, e de na grande maioria deles não ser necessário diminuir o leque de nós a estudar, de modo a definir-se um critério universal a aplicar, definiu-se que os dados do perfil de velocidades relativos a 2/3 do raio interior da conduta não são considerados para a análise através do método dos ângulos, sem perda de qualquer mais valia para a determinação de  $\delta$ .

O perfil de velocidades do convergente  $c/L=0,15$ , apresentado ampliado junto à parede do convergente na Figura 7.16 do capítulo Apêndices, apresenta uma flutuação no perfil de velocidades, indicadora de iminência de recirculação. O formato do perfil junto da parede teria o potencial para «desorientar» o método do cálculo dos ângulos, no entanto o mesmo não se verificou.

O método do menor ângulo entre segmentos de reta do perfil de velocidades adjacentes, descrito para determinar a espessura da camada limite, verificou ser mais robusto que o convencionalmente utilizado na teoria da placa plana, especialmente para um escoamento no interior de uma conduta como o do nosso.

### ***Determinação de $\delta^*$ , $\theta$ e $H$ : Regra dos trapézios***

Após a identificação do valor de  $\delta$  é possível para cada uma das secções dos convergentes proceder ao cálculo dos parâmetros  $\delta^*$ ,  $\theta$ , e consequentemente  $H$ , descritos no capítulo 2.1.5.1. Todos eles se baseiam no cálculo de um integral definido de uma função – o fator de forma indiretamente. Visto que não possuímos as expressões das suas funções, apenas valores discretos de velocidade do escoamento, é necessário recorrer aos métodos de quadratura numérica. É aplicada a Regra dos Trapézios simples (definida pela equação 7.4) é obtida a partir do polinómio interpolador de Lagrange no intervalo  $[a,b]$ , num conjunto de nós distintos.

$$I \approx \int_a^b \frac{b-a}{2} \times [f(x_a) + f(x_b)] dx \quad (7.4)$$

Este método tem como vantagem em relação a outros mais precisos ser prático de aplicar a um intervalo com qualquer número de nós. A função a integrar apenas precisa dos valores em dois nós de forma a obter um valor da integração num intervalo. Os extremos do intervalo da expressão 7.4 referem-se a dois nós distintos, pelo que os valores de  $\delta^*$  e  $\theta$  são obtidos através do somatório dos vários intervalos ao longo do perfil de velocidades, que compõem o perfil inteiro.

Apesar de este processo de integração não produzir resultados exatos, como os perfis de velocidades apresentados não são «irregulares», possuindo monotonia bem comportada e os espaçamentos entre os nós ao serem tão pequenos, os segmentos de reta que os unem aproximam com bastante semelhança o perfil de velocidades real. Desta forma, o erro obtido pela integração através da regra dos trapézios é considerado bastante pequeno.



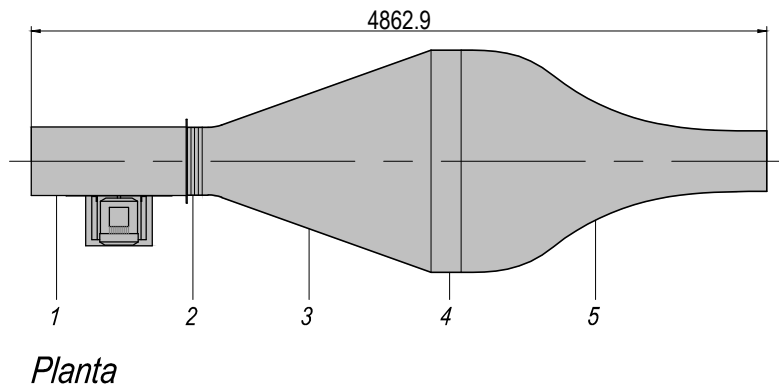
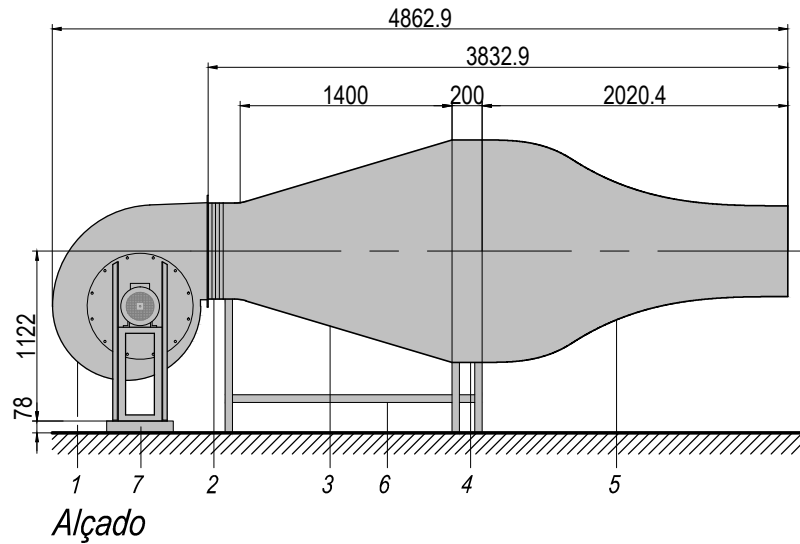
## **Índice de Desenhos**

Figura 7.28 Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Desenho de Conjunto

Figura 7.29 Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Alçado Principal

Figura 7.30 Projeto do Túnel Aerodinâmico de Sopro – Planta

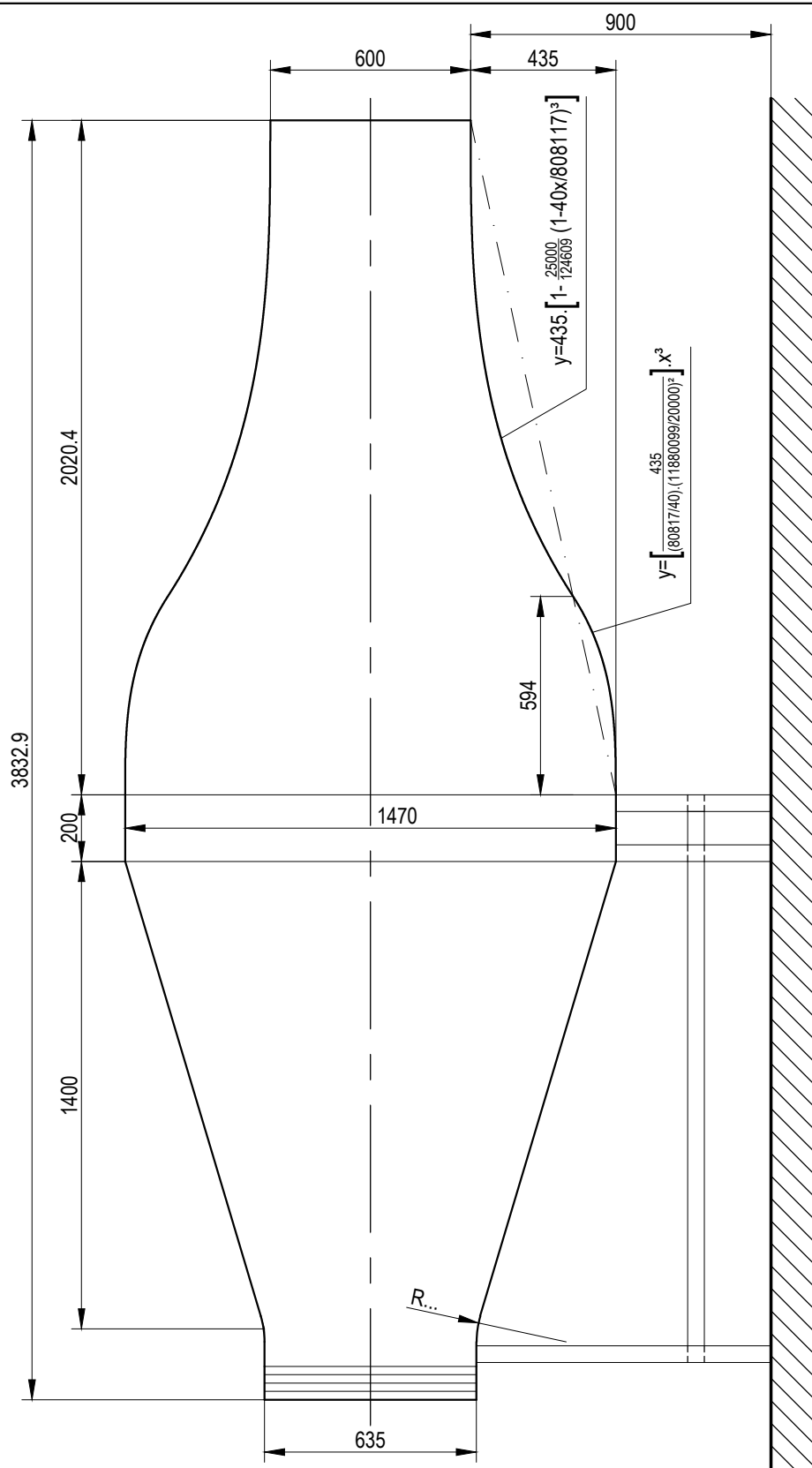




1	Sinobloco			7			
1	Estrutura de suporte			6			
1	Convergente			5			
1	Câmara de tranquilização			4			
1	Difusor			3			
1	Tela			2			
1	Ventilador radial			1			
Nº	Designação	Nº da Norma Nº do Desenho		Material	Nº Ref.	Produto Semi Acabado Nº do Molde      Nº da Matriz	Peso      Observações
	Proj.	2016/9/23	Gonçalo Pereira	LMFTA - DEMI		<div>FCT</div> <div>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA</div>	
	Des.	2016/9/23	Gonçalo Pereira				
	Escala 1/50	<div>Túnel Aerodinâmico de Sopros</div> <div>Desenho de Conjunto</div>				<div>1</div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div>	

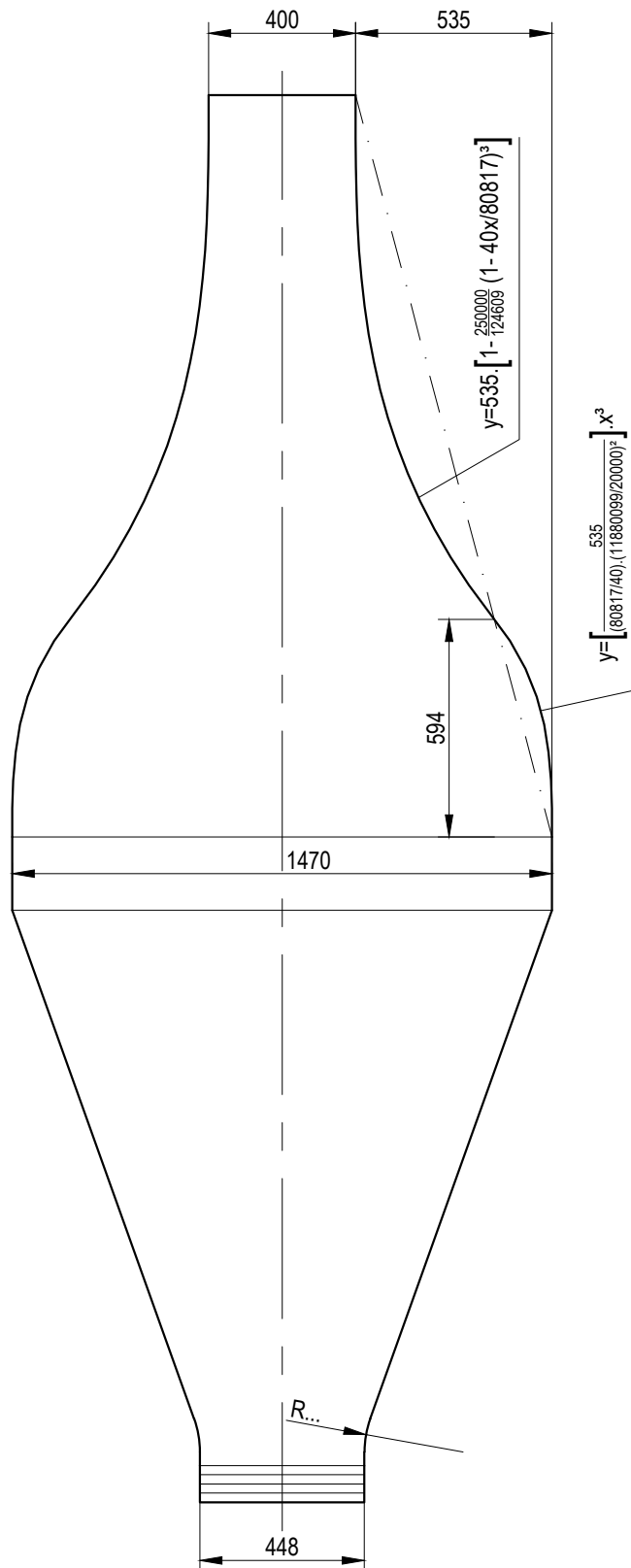






Observações		Proj.	2016/9/23	Gonçalo Pereira	LMFTA - DEMI					<div>FCT</div> <div>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA</div>					
- Cotas referentes a dimenões interiores		Des.	2016/9/23	Gonçalo Pereira											
		Escala 1/20	Túnel Aerodinâmico de Sopro Alçado Principal					2							
								Substitui							
								Substituido por							





Observações	Proj.	2016/9/23	Gonçalo Pereira	LMFTA - DEMI	<div>FCT</div> <div>FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA</div>	
- Cotas referentes a dimenões interiores	Des.	2016/9/23	Gonçalo Pereira			
	Escala 1/20	Túnel Aerodinâmico de Sopros Planta			3	
Substituído por						
Substituído por						



## **ANEXOS**

Apresenta-se o ábaco de Levin (1968) do estreitamento hidráulico em condutas circulares.

Exemple :  $D_0 = 1,8 \text{ m}$   $D = 0,6 \text{ m}$   $m = \frac{1,8 - 0,6}{2} = 0,6$   
 Pour  $c/L = 0,3$ , on trouve  $L/D_0 > 1,4$  ;  $L = 1,5 \cdot 1,8 = 2,7 \text{ m}$   
 $a = \frac{0,6}{0,81 \times 2,7} = 0,339$   $b = \frac{0,6}{2,7 \cdot 1,89^2} = 0,062$

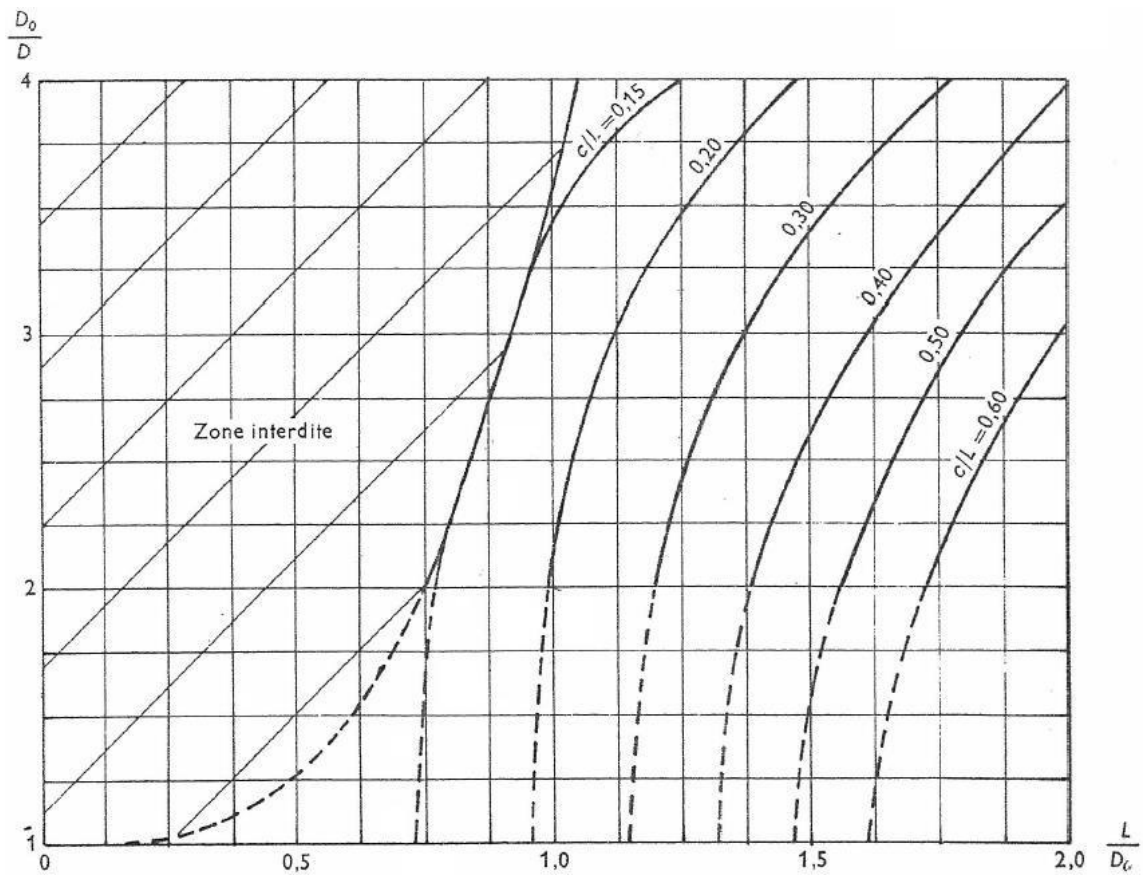
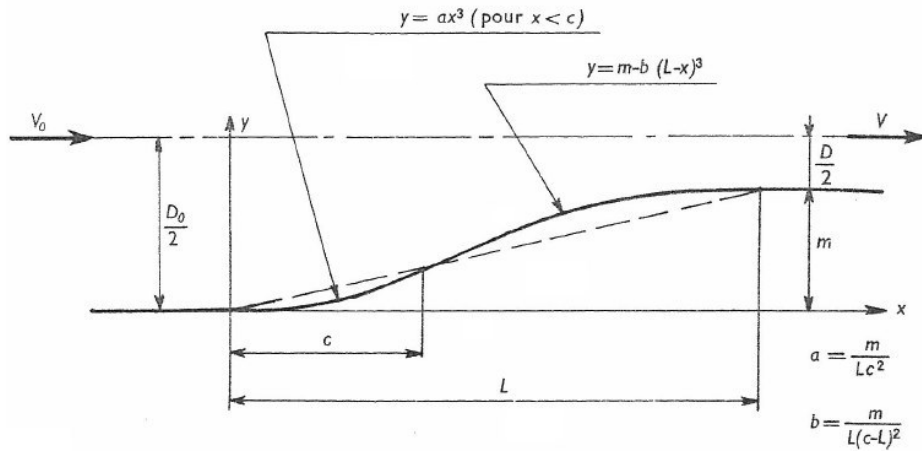


Figura 8.1 – Ábaco: Redução suave da área da secção circular de condutas [Levin, 1968]